



دانشکده مهندسی برق

بررسی اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در خطوط هوایی شبکه توزیع با استفاده از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عبدالغنی آرخی

استاد راهنما:

دکتر احمد غلامی

خردادماه ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

نام دانشکده : برق

نام دانشجو : عبدالغنی آرخی

عنوان پایان‌نامه : بررسی اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در خطوط هوایی شبکه توزیع با استفاده

از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه

تاریخ دفاع :

رشته : مهندسی برق - قدرت

گرایش : سیستم‌های قدرت

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه/ موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر احمد غلامی	دانشیار	علم و صنعت ایران	
۲	استاد راهنما				
۳	استاد مشاور				
۴	استاد مشاور				
۵	استاد مدعو خارجی				
۶	استاد مدعو خارجی				
۷	استاد مدعو داخلی				
۸	استاد مدعو داخلی				

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

بسمه تعالی

اینجانب عبدالغنی آرخی به شماره دانشجویی ۹۱۶۱۳۰۰۱ دانشجوی رشته مهندسی برق (سیستم‌های قدرت) مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی : عبدالغنی آرخی

امضاء و تاریخ :

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط

استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است :

- ❖ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان بلامانع است.
- ❖ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ❖ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد راهنما : دکتر احمد غلامی

تاریخ :

امضاء :

تشکر و قدردانی

با سپاس از سه وجود مقدس :

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

چکیده

امروزه قابلیت اطمینان و کیفیت توان یکی از مفاهیم بسیار مهم و مورد توجه در مطالعات شبکه‌های توزیع می‌باشد. در مطالعات انجام گرفته بر روی شبکه توزیع مشخص شده که مهم‌ترین عامل ایجاد اختلال در عملکرد شبکه توزیع، خاموشی‌ها و اختلالات ناشی از وقوع صاعقه می‌باشد. همچنین در مطالعات علمی مشخص گردیده است که ضربات غیرمستقیم صاعقه از فراوانی بسیار بیشتری نسبت به ضربات مستقیم برخوردار می‌باشند. به طوری که در اسناد علمی معتبر بیان شده است ۹۰ درصد خاموشی‌های ایجاد شده در خطوط هوایی شبکه توزیع ناشی از ضربات غیرمستقیم صاعقه می‌باشد.

با توجه به مطالب بیان شده ارزیابی عملکرد خطوط هوایی شبکه توزیع تحت شرایط وقوع صاعقه برای طراحی بهینه شبکه توزیع و بررسی عملکرد شبکه‌های موجود و بهبود عملکرد آنها به شدت مورد نیاز می‌باشد.

در این پایان‌نامه ابتدا مکانیسم وقوع صاعقه بررسی شده و با توجه به آن مفهوم ضربه برگشتی صاعقه بیان گردیده است. در ادامه نیز مدل‌های ارائه شده برای جریان و ضربه برگشتی صاعقه بررسی شده‌اند. همچنین روابط و روش‌های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در دو وضعیت زمین بدون تلفات و زمین دارای تلفات معرفی گردیده‌اند. همچنین مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه که دقیق‌ترین مدل معرفی شده برای کانال صاعقه می‌باشد، شرح داده شده و با استفاده از این مدل اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی مورد محاسبه قرار گرفته است. در ادامه مطالعات صورت گرفته، تأثیر در نظر گرفتن شرایط محیطی و وابسته بودن رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل ذکر گردیده است.

کلید واژه‌ها : ضربات غیرمستقیم صاعقه – مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه – اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه – شرایط محیطی – رسانایی الکتریکی زمین

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- آشنایی با پدیده تخلیه الکتریکی
۴	۳-۱- اهمیت حفاظت سیستم قدرت در برابر صاعقه
۷	۴-۱- ساختار پایان نامه
۸	فصل ۲: مروری بر پیشینه تحقیق
۹	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- تاریخچه
۱۱	۳-۲- ضربه برگشتی صاعقه
۱۲	۱-۳-۲- مدل های ضربه برگشتی صاعقه
۱۷	۲-۳-۲- جریان کانال پایه
۱۷	۱-۲-۳-۲- مدل بروس و گولد
۱۹	۲-۲-۳-۲- مدل پیرس و کیانوس
۲۰	۳-۲-۳-۲- مدل هایدلر
۲۲	۴-۲- روش های محاسبه اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در خط هوایی
۲۳	۱-۴-۲- فرمول راسک
۲۵	۲-۴-۲- فرمول چادوری - گروس
۲۸	۳-۴-۲- فرمول لیو - مایر
۲۹	۴-۴-۲- فرمول هویدالن
۳۱	۵-۴-۲- روش دقیق محاسبه اضافه ولتاژ القایی برای زمین بدون تلفات
۳۲	۱-۵-۴-۲- حل دقیق میدان الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه
۳۴	۲-۵-۴-۲- حل دقیق میدان ناشی از صاعقه برای تزویج با خط هوایی
۳۵	۳-۵-۴-۲- راه حل دقیق محاسبه اضافه ولتاژ القایی
۴۳	۶-۴-۲- روش محاسبه اضافه ولتاژ القایی برای زمین دارای تلفات

۴۵ ۴-۲- جمع بندی

فصل ۳ : روش تحقیق

۴۷ ۱-۳- مقدمه

۴۷ ۲-۳- مدل الکترومغناطیسی برای ضربه برگشتی صاعقه

۵۱ ۳-۳- الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان (FDTD)

۵۸ ۴-۳- تاثیر شرایط محیطی بر روی انتشار امواج الکترومغناطیسی در هوا

۵۹ ۱-۴-۳- رطوبت نسبی هوا

۶۰ ۱-۴-۳- دمای هوا

۶۱ ۱-۴-۳- فشار هوا

۶۲ ۵-۳- وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس

۶۴ ۶-۳- جمع بندی

فصل ۴ : نتایج و تفسیر آنها

۶۶ ۱-۴- مقدمه

۶۶ ۲-۴- شبیه سازی مسئله مورد نظر

۶۹ ۳-۴- تاثیر شرایط محیطی بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه

۶۹ ۱-۳-۴- تاثیر تغییرات رطوبت نسبی هوا

۷۰ ۲-۳-۴- تاثیر تغییرات فشار هوا

۷۰ ۳-۳-۴- تاثیر تغییرات دمای هوا

۷۱ ۴-۳-۴- میزان اثرگذاری ϵ_r هوا با توجه به فاصله کانال صاعقه از خط هوایی

۷۸ ۴-۴- تاثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی ولتاژ القایی

۸۴ ۵-۴- جمع بندی

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۷ ۱-۵- جمع بندی

۸۸ ۲-۵- نتیجه گیری

۸۹ ۳-۵- پیشنهادها

۹۰ مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) نمایش یک ضربه صاعقه منفی ابر به زمین ۴
- شکل (۱-۲) شکل مربوط به چگونگی تشکیل ضربه برگشتی صاعقه ۱۲
- شکل (۲-۲) مدل مهندسی کانال صاعقه برگشتی و نحوه تزویج آن با خطوط ۱۴
- شکل (۳-۲) شکل موج جریان کانال پایه مدل بروس و گولد ۱۸
- شکل (۴-۲) موج جریان کانال پایه مدل پیرس و کیالون ۱۹
- شکل (۵-۲) شکل موج جریان کانال پایه مدل هایدلر ۲۱
- شکل (۶-۲) شکل موج جریان کانال پایه مدل هایدلر برای بازه زمانی ابتدایی ۲۱
- شکل (۷-۲) مدل کانال صاعقه ۲۲
- شکل (۸-۲) ساختار مسئله برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی ۳۲
- شکل (۹-۲) خط دوتایی با طول نیمه محدود ۳۵
- شکل (۱۰-۲) قسمت محوری میدان الکتریکی در طول خط برای مدل شکل ۲-۷-الف ۳۷
- شکل (۱۱-۲) ولتاژ القا شده به دست آمده توسط راه‌حل دقیق مربوط به مدل شکل ۲-۷-الف ۳۹
- شکل (۱۲-۲) ولتاژ القا شده در خطی که 50 m از کانال صاعقه فاصله دارد ۴۰
- شکل (۱۳-۲) ولتاژ القا شده در خطی که 100 m از کانال صاعقه فاصله دارد ۴۰
- شکل (۱۴-۲) ترسیم سه بعدی موج ولتاژ القا شده در خطی که 100 m از کانال صاعقه فاصله دارد ۴۱
- شکل (۱-۳) چهار نوع مدل الکترومغناطیسی معرفی شده برای کانال صاعقه ۴۹
- شکل (۲-۳) نحوه توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در سلول شبکه FDTD ۵۴
- شکل (۳-۳) فلوجارت الگوریتم جهش قورباغه برای روش FDTD ۵۶
- شکل (۴-۳) میزان تضعیف امواج الکترومغناطیسی در هوا به ازای نرخ بارندگی‌های متفاوت ۵۸
- شکل (۵-۳) مقدار تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از رطوبت نسبی هوا ۶۰
- شکل (۶-۳) مقدار تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از دمای هوا ۶۱
- شکل (۷-۳) رسانایی الکتریکی زمین به ازای تغییرات فرکانس ۶۲
- شکل (۱-۴) نمای کلی سیستم به کار رفته برای مطالعات ۶۷
- شکل (۲-۴) شکل موج اضافه ولتاژهای القایی ناشی از صاعقه در فاصله‌های مختلف از خط هوایی الف) نتایج مرجع [۲۶] ب) نتایج به دست آمده از نرم‌افزار CST ۶۸
- شکل (۳-۴) سیستم مدل شده در نرم‌افزار CST ۶۸
- شکل (۴-۴) اضافه ولتاژهای القایی به دست آمده برای فواصل مختلف کانال صاعقه از خط هوایی در شرایط استاندارد و غیراستاندارد ۷۲
- شکل (۵-۴) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی در زیر خط هوایی در وضعیت هوا خشک ۷۴
- شکل (۶-۴) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی دقیقاً در زیر خط هوایی هوا با رطوبت نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد ۷۵

- شکل (۴-۷) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی در زیر خط هوایی برای هوای در ارتفاع 10 m و 2000 m ۷۶
- شکل (۴-۸) اندازه میدان الکترومغناطیسی در زیر خط هوایی برای هوا با دمای 10 و 30 درجه سانتی‌گراد..... ۷۷
- شکل (۴-۹) اضافه ولتاژهای القایی در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس..... ۷۹
- شکل (۴-۱۰) توزیع شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در ارتفاع $9/98\text{ m}$ و اندازه چگالی تلفات توان در زمین برای $\sigma_g = 0/1\text{ s/m}$ ۸۱
- شکل (۴-۱۱) توزیع شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در ارتفاع $9/98\text{ m}$ و اندازه چگالی تلفات توان در زمین برای $\sigma_g = 0/01\text{ s/m}$ ۸۲
- شکل (۴-۱۲) توزیع اندازه چگالی تلفات توان در سطح زمین..... ۸۴

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) مشخصات مربوط به مدل‌های ضربه برگشتی صاعقه ۱۷
- جدول (۲-۲) مقادیر پارامترهای جریان کانال پایه ۱۹
- جدول (۳-۲) مقادیر پارامترهای جریان کانال پایه پیشنهادی توسط هایدلر ۲۰
- جدول (۱-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات رطوبت نسبی هوا (RH) ۷۰
- جدول (۲-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات فشار هوا (P) ۷۰
- جدول (۳-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات دمای هوا (T) ۷۱
- جدول (۴-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژهای القایی در فواصل مختلف کانال صاعقه از خط هوایی در شرایط استاندارد و غیراستاندارد ۷۲
- جدول (۵-۴) بیشینه مقدار اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی در وضعیت‌های مختلف شرایط محیطی ۷۴
- جدول (۶-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس ۸۰

پارامترها

Z_c : امپدانس مشخصه خط	b_y : قسمت y میدان مغناطیسی
β : نسبت بین سرعت ضربه برگشتی و سرعت نور	c : سرعت نور
δ : $\sqrt{d^2 + x^2}/\gamma$	c' : کاپاسیتانس در واحد طول
δ_l : $\sqrt{d^2 + x_l^2}/\gamma$	d : فاصله افقی بین کانال صاعقه و خط
γ : $1/\sqrt{1 - \beta^2}$	e_r : قسمت شعاعی میدان الکتریکی
ϵ_0 : گذردهی (ثابت دی الکتریک هوا)	e_x : قسمت محوری میدان الکتریکی
λ_m : $\beta(ct - x) - h$	e_z : قسمت عمودی میدان الکتریکی
λ_p : $\beta(ct - x) + h$	h_ϕ : قسمت azimuthal میدان مغناطیسی
λ : $\beta ct - h$	h : ارتفاع خط
λ' : $\beta ct + h$	$i(x, t)$: جریان در طول خط
μ_0 : نفوذ پذیری مغناطیسی هوا	l' : اندوکتانس در واحد طول
ξ_0 : امپدانس مشخصه هوا	t_0 : $\sqrt{x^2 + z^2}/c$
	t_1 : $\sqrt{x^2 + d^2 + h^2}/c$
	$v(x, t)$: ولتاژ در طول خط
	I_0 : جریان ضربه برگشتی

۱- فصل اول :

مقدمه

۱-۱- مقدمه :

در چند دهه اخیر با افزایش روز افزون تجهیزات الکترونیکی تأثیرپذیری آنها از حالت‌های گذرای ناشی از پدیده‌های طبیعی، خصوصاً در مقابل برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه توجه صاحب‌نظران را به این مهم معطوف نموده است. امروزه در حوزه سیستم‌های قدرت، صاعقه یکی از مهم‌ترین اختلالات غیرپریودیک در شبکه توزیع می‌باشد که اثرات شدیدی بر روی کیفیت توان و قابلیت اطمینان شبکه می‌گذارد، اصطلاحاً به این فعالیت‌ها ضربات مستقیم صاعقه می‌گویند. به علت ارتفاع محدود خطوط توزیع هوایی نسبت به ساختمان‌های مجاور و همچنین معمولاً به دلیل عدم استفاده از سیم محافظ در اکثر خطوط توزیع هوایی ضربات غیرمستقیم از فراوانی بیشتری نسبت به ضربات مستقیم برخوردار می‌باشند، به همین دلیل در این پایان‌نامه بر روی این موضوع تمرکز شده است.

در این فصل ابتدا یک معرفی کلی از پدیده تخلیه الکتریکی (صاعقه) ارائه خواهد شد. در ادامه در رابطه با چگونگی تأثیرگذاری صاعقه بر روی یک سیستم قدرت و اهمیت حفاظت سیستم قدرت در مقابل صاعقه مطالبی ذکر شده و در نهایت روندی که در طول پایان‌نامه دنبال خواهد شد، معرفی می‌گردد.

۱-۲- آشنایی با پدیده تخلیه جوی (صاعقه)

بر طبق مشاهدات و تجربیات روزانه، بروز طوفان‌های موضعی در شرایط جوی مناسب یونیزه گشتن مولکول‌های بخار آب و مولکول‌های تشکیل دهنده ابرها را سبب گردیده و بارهای الکتریکی مثبت و منفی در آنها را تقسیم و متراکم می‌سازد. ذرات حامل بارهای مثبت در یک طرف و بارهای منفی در طرف دیگر ابرها انباشته می‌شوند و توده ابرها با بارهای الکتریکی را به وجود می‌آورند. ظهور ابرها با بارهای الکتریکی تفکیک شده و دو قطب مثبت و منفی را اصطلاحاً پلاریزه شدن ابر می‌گویند. با ایجاد دو قطب منفی و مثبت، میدان الکتریکی در حد فاصل آنان به وجود می‌آید و انباشته گشتن هرچه بیشتر بارها شدت میدان الکتریکی را به طور مداوم افزایش می‌دهد.

در صورت تجاوز میدان الکتریکی ایجاد شده از شدت میدان مقاوم هوا، قوس و تخلیه الکتریکی بین دو قطب مثبت و منفی در ابر روی می‌دهد. با تراکم بارها در ابر و قطبی شدن آن، بارهای الکتریکی متناظر نیز در سطح زمین القا گشته و به دنبال آن شدت میدان الکتریکی در حد فاصل ابر و زمین زیادتر می‌گردد به طوری که قوس و تخلیه جوی در داخل ابرها، بین ابرها و یا ابرها با زمین روی می‌دهد. قوس به صورت مسیر الکتریکی مناسب در پی نزدیک گشتن بارهای الکتریکی ناهمنام و جذب آنان به یکدیگر در حد فاصل دو قطب ظاهر می‌گردد. با بروز قوس، بارهای الکتریکی مثبت و منفی انباشته شده در دو طرف ابر و یا ابر و زمین به سوی یکدیگر جریان یافته با یکدیگر جمع شده، همدیگر را خنثی ساخته و مولکول‌های کامل را پدید می‌آورند که این عمل به پدیده تخلیه بارهای الکتریکی مرسوم می‌باشد. با تخلیه بارها از شدت میدان الکتریکی کاسته شده، قوس خفه گشته و تخلیه قطع می‌گردد. مسیر تخلیه بارها و محل بروز قوس در طول چند میلی‌ثانیه یونیزه و هادی می‌گردد، با خفه گشتن قوس، مسیر فوق مجدداً دیونیزه گشته و از خاصیت دی‌الکتریک کامل برخوردار می‌گردد. بروز قوس تخلیه با نور و صدای شدیدی همراه است که به همین علت پدیده فوق اصطلاحاً رعد و برق¹ نامیده می‌شود.

تخلیه الکتریکی عموماً سه نوع ضربه صاعقه را ایجاد می‌کند.

۱- ضربات درون ابر

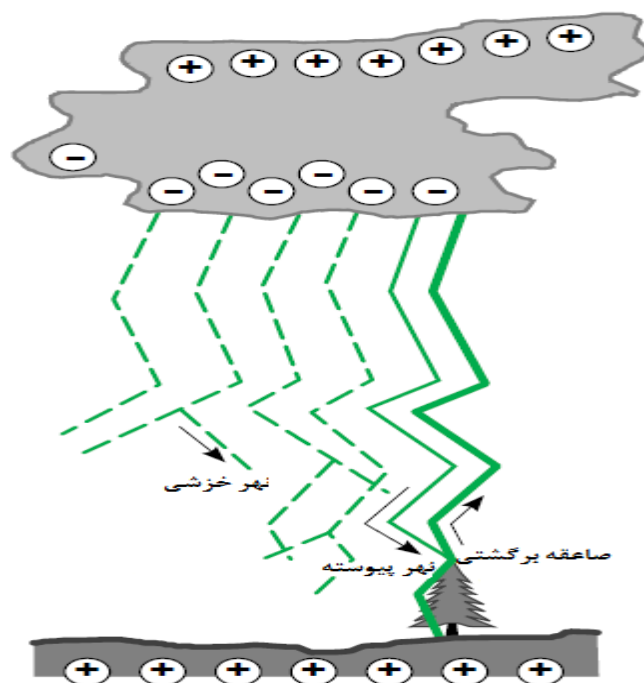
۲- ضربات بین ابرهای همجوار (ضربات در میان ابرها)

۳- ضربات بین ابر و زمین

در مراجع علمی، به طور سنتی اضافه ولتاژ القایی صاعقه بر اثر صاعقه بین ابر و زمین در نظر گرفته می‌شود. معمولاً در صاعقه‌های ابر به زمین هر یک از بارهای مثبت یا منفی ممکن است به سمت زمین شارش یابند اگر ضربه اولیه به زمین دارای بار منفی باشد، ضربه بعدی با بار مثبت به زمین می‌رسد. در مورد فرآیند ضربه مثبت به دلیل تعداد وقوع کمتر نسبت به ضربات با پلاریته منفی اطلاعات زیادی در دسترس نمی‌باشد. به همین دلیل در اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه صاعقه با ضربه منفی مورد بحث قرار می‌گیرد که مطالعات صورت گرفته در این پایان‌نامه نیز مستثنا از این قضیه نمی‌باشد. هرچند اطلاعات موجود نشان می‌دهد که مکانیسم ضربه مثبت

¹ Lightning

با اندکی تفاوت مشابه ضربه منفی می‌باشد. در شکل ۱-۱ چگونگی وقوع یک ضربه صاعقه منفی ابر به زمین نشان داده شده است. همچنین بهتر است بدانیم که ضربات مثبت ممکن است شامل یک ضربه برگشتی باشند در حالی که ضربات منفی شامل چندین ضربه برگشتی می‌باشند. همه فرآیندهای وابسته به هر یک از ضربات صاعقه مثبت و منفی شامل حرکت و شارش بارهای الکتریکی می‌باشند که خود باعث ایجاد میدان الکترومغناطیسی و انتشار آن در هوا می‌گردد. در فصول بعدی جزئیات بیشتری در مورد مدل‌های متفاوت ضربه برگشتی مورد استفاده برای مدل-سازی میدان الکترومغناطیسی مشابه آنچه توسط صاعقه تولید می‌شود، بیان می‌گردد.



شکل (۱-۱) نمایش یک ضربه صاعقه منفی ابر به زمین

۳-۱- اهمیت حفاظت سیستم قدرت در برابر صاعقه

یک ضربه صاعقه می‌تواند اضافه ولتاژهای گذرای روی خطوط هوایی از سه طریق ایجاد کند [۱].

۱- اصابت مستقیم به هادی یک فاز

۲- برخورد مستقیم به دکل‌ها یا سیم‌های محافظ (گارد)

۳- اصابت به زمین اطراف خطوط هوایی

اضافه ولتاژهایی که از سه طریق ذکر شده ایجاد می‌شوند به حداکثر دامنه و زمان پیشانی موج جریان صاعقه، زمان پیشانی و سرعت ضربه برگشتی و ارتفاع ابر بستگی دارند. انرژی ناشی از تشعشع صاعقه ممکن است از حد حرارتی اشیائی که صاعقه به آنها برخورد می‌کند تجاوز کند و باعث خطاهای حرارتی گردد. صاعقه یک سیستم قدرت را از دو راه خراب می‌کند.

- ۱- ولتاژ در سراسر سیستم افزایش یافته چنان که در میان ترمینال‌های سیستم جرقه زده و باعث اتصال کوتاه سیستم یا ایجاد سوراخ‌هایی در عایق‌بندی الکتریکی سیستم می‌شود.
- ۲- انرژی ضربه صاعقه از انرژی قابل تحمل سیستم زیاد بوده و باعث ذوب شدن یا شکستگی می‌گردد.

یک صاعقه به طور کلی دارای چندین ضربه می‌باشد که در بیشتر اوقات ضربه اول نسبت به ضربات بعدی شدت بیشتری دارد. بین دو ضربه متوالی جریان جاری می‌باشد که باعث افزایش انرژی تزریق شده به جسمی که صاعقه به آن برخورد کرده است، می‌شود.

ولتاژ گذرای ناشی از ضربه صاعقه به وسیله ضربه مستقیم یا ضربه غیرمستقیم تولید می‌شود. ضربه مستقیم می‌تواند شامل برخورد مستقیم ضربه صاعقه به دستگاه قدرت باشد. در این حالت یک موج ولتاژ سیار در خط تولید می‌شود که در طول خط حرکت می‌کند. این موج سیار می‌تواند ترمینال‌های یک دستگاه یا عایق بین هادی‌های فاز و بازوی افقی دکل را تحت تأثیر قرار دهد. اگر ولتاژ به اندازه کافی زیاد شود، تشعشعی که در عایق ایجاد می‌شود باعث ایجاد اتصال کوتاه در سیستم می‌شود. خیلی از خطوط انتقال هوایی برق به سیم‌های پوشش‌دار برای پوشش هادی فاز مجهز هستند. با این وجود، وقتی که صاعقه از این پوشش‌ها عبور کرده و به هادی می‌رسد خطاهایی در این پوشش‌ها ایجاد می‌گردد. وقتی که صاعقه به دکل برخورد می‌کند یک ولتاژ سیار تولید می‌شود که به سمت بالا و پایین دکل حرکت می‌کند و در پای دکل و بالای دکل منعکس می‌شود و ولتاژ در بازوی افقی دکل را افزایش می‌دهد که می‌تواند باعث تنش در عایق‌ها (مقره‌ها) گردد. یعنی اگر این ولتاژها از سطح استقامت عایق‌ها تجاوز کند ممکن است پدیده جرقه در عایق -

ها از سمت دکل به سمت هادی فاز^۱ ایجاد شود. وقتی که یک صاعقه به سیم محافظ برخورد می‌کند یک ولتاژ سیار تولید می‌نماید که به سمت نزدیک‌ترین دکل حرکت کرده و انعکاس‌های چندگانه را در دکل ایجاد نموده و باعث جرقه سطحی^۲ در عایق‌ها می‌گردد [۱].

وقتی صاعقه چندین متر دورتر از خطوط به زمین برخورد می‌کند (ضربه غیرمستقیم صاعقه) میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از صاعقه می‌توانند ولتاژ زیادی را روی خطوط القا کنند که می‌تواند برای عایق‌های خطوط ولتاژ پایین^۳ و ولتاژ متوسط^۴ مشکل‌ساز باشد.

سطح استقامت یک سیستم قدرت در برابر ولتاژهای گذرا عدد منحصر به فردی نیست. به طوری که یک سیستم قدرت ممکن است بتواند در مقابل ولتاژ گذرای بزرگ‌تری که مدت زمان کوتاه‌تری دارد استقامت کند در حالی که در برابر ولتاژ گذرای کوچک‌تری که مدت زمان وقوع بیشتری دارد، نتواند استقامت کند. این ویژگی‌های عایق به عنوان ویژگی‌های ولتاژ-زمان^۵ عایق شناخته می‌شوند [۲].

اضافه ولتاژ القایی صاعقه^۶ با دامنه کاهش یافته خود (که برای خطوط توزیع احتمال بزرگ‌تر شدن دامنه آن از ۳۰۰ کیلو ولت ناچیز است) فقط در خطوط ولتاژ متوسط و پایین می‌تواند منجر به خرابی شود.

اضافه ولتاژ القایی صاعقه به علت فرکانس بالایشان عامل اصلی در خرابی عایق خطوط توزیع نیرو می‌باشد. شکل موج اضافه ولتاژ به طور قابل ملاحظه‌ای با جریان تولیدی‌شان تفاوت دارد [۳]. اکثر مطالعات به این نتیجه رسیده‌اند که شکل مناسب اضافه ولتاژ یک ضربه است که معمولاً دارای زمان پیشانی حدود ۱ μs و مدت زمان رسیدن به نصف دامنه در حدود چند میکروثانیه می‌باشد. حتی در حالتی که به خاطر دامنه کم، شکستی اتفاق نیفتد این اضافه ولتاژ می‌تواند به طور جدی روی مشترکین ولتاژ پایین شبکه توزیع تأثیر بگذارد چرا که این اضافه ولتاژها در خطوط انتشار می‌یابند و به داخل ترانسفورماتورهای کاهنده انتقال می‌یابند. در شبکه‌های ولتاژ پایین اگر

¹ Backflash

² Flashover

³ Low Voltage (LV)

⁴ Medium Voltage (MV)

⁵ Volt-Time

⁶ Lightning induced over voltage

حفاظت کافی به کار گرفته نشود اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی می‌تواند منشأ ایجاد خرابی‌های قابل توجهی باشد. هدف از این مطالعات و بررسی‌ها دستیابی به دامنه و پارامترهای زمانی اضافه ولتاژ رسیده به نقطه اتصال مشترک ولتاژ پایین به منظور اتخاذ اقدامات کافی برای کاهش تنش دی‌الکتریک عایق‌های آنها می‌باشد [۳]. این چنین مطالعاتی برای کسب اطمینان از رسیدن توان با سطح کیفیت مناسب به مصرف کنندگان که تجهیزات متنوع و با حساسیت بالا را مورد استفاده قرار می‌دهند امری اجتناب ناپذیر می‌باشد.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه در فصل دوم مطالبی در ارتباط با معرفی اقدامات و پژوهش‌هایی که در گذشته در ارتباط با این موضوع صورت گرفته، بیان می‌گردد. برای این منظور ابتدا جریان ضربه برگشتی و مدل‌های مختلف آن معرفی و در ادامه فصل روش‌های ارائه شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه معرفی می‌شود. در فصل سوم مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه معرفی و با سایر مدل‌ها مقایسه می‌گردد. در ادامه فصل سوم روش حل مسئله که استفاده از نرم‌افزار CST می‌باشد تشریح می‌گردد. نرم‌افزار CST برای حل معادلات الکترومغناطیس از الگوریتم FDTD بهره می‌گیرد که این الگوریتم در فصل سوم شرح داده می‌شود. در ادامه نیز نحوه شبیه‌سازی مسئله مورد نظر تشریح می‌گردد. در فصل چهارم تأثیر شرایط محیطی و وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه بررسی می‌شود. در ادامه این فصل نتایج حاصل از مطالعات و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه آورده شده و ارزیابی می‌گردند. در فصل آخر نیز نتایج به دست آمده از این پایان‌نامه جمع‌بندی شده و چند پیشنهاد برای ادامه کار ارائه خواهد شد.

۲- فصل دوم :

مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

صاعقه به تنهایی می‌تواند یکی از عوامل اصلی خرابی در تجهیزات سیستم توزیع باشد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در اسناد علمی معتبر این گونه بیان شده که ۹۰ درصد خاموشی‌های ایجاد شده در خطوط هوایی شبکه توزیع ناشی از ضربات غیرمستقیم صاعقه می‌باشد [۴]. حفاظت شبکه‌های توزیع در مقابل صاعقه باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه و همچنین کاهش هزینه‌های ناشی از آسیب دیدگی تجهیزات می‌گردد. پیش‌نیاز محافظت شبکه در برابر پدیده صاعقه بررسی نحوه و میزان اثرگذاری این پدیده بر روی شبکه مورد نظر می‌باشد. مطالعات صورت گرفته در ارتباط با محاسبه ولتاژهای القایی ناشی از صاعقه معمولاً بر روی سه موضوع محوری تمرکز دارند، به طوری که این سه موضوع در تمامی روش‌های مطرح شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی به وضوح قابل رؤیت می‌باشد.

۱- اتخاذ یک مدل مناسب برای توصیف جریان ضربه برگشتی در طول کانال صاعقه

۲- محاسبه میدان الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه در طول خط هوایی

۳- محاسبه ولتاژهای القا شده به وسیله مدل تزویج

در این فصل به معرفی رویه‌های پیشنهادی جهت محاسبه اضافه ولتاژهای ناشی از ضربه غیرمستقیم صاعقه بر روی خطوط هوایی شبکه توزیع پرداخته شده است. ولی لازمه این کار آشنایی با ضربه برگشتی و پارامترهای مرتبط با آن از جمله جریان کانال پایه می‌باشد. بنابراین لازم است ابتدا یک دید کلی نسبت به ضربه برگشتی صاعقه و مدل‌های مربوط به آن به دست آورده و سپس به معرفی راه‌حل‌های محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه پرداخته شود. یک روش خوب و جامع برای محاسبه اضافه ولتاژهای ناشی از ضربه غیرمستقیم صاعقه بر روی خطوط هوایی شبکه توزیع، باید حداقل دارای خصیصه‌های زیر باشد:

➤ سادگی و قابل فهم بودن

➤ کارایی بالا

➤ قابلیت توسعه

➤ سرعت بالا در ارزیابی عملکرد خطوط

➤ داشتن دقت مناسب در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از استانداردهای بین‌المللی

لازم به ذکر است که در این فصل رویه‌های معرفی شده، بر پایه رهیافت‌های تحلیلی محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه می‌باشند.

۲-۲- تاریخچه

صاعقه یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی می‌باشد که از آغاز شهرنشینی مورد توجه انسان قرار گرفته است. در سال ۱۸۴۷ بنیامین فرانکلین برای اولین بار آزمایش‌هایی به وسیله کایت برای نشان دادن صاعقه در اثر وجود بار الکتریکی و شارش آن انجام داده است. از آن پس دانشمندان زیادی سعی کرده‌اند مکانیسم پدیده صاعقه و اثرات ناشی از آن را توضیح دهند.

برای اولین بار در سال ۱۹۰۸ واگنر مطالعات نظری بر روی اثرات القایی صاعقه بر روی خطوط انتقال انجام داده است. او تئوری خود را بر پایه فرضیاتی بنیان نهاده که عبارت‌اند از: ابر باردار در بالای خط انتقال باعث القای بار با علامت مثبت بر روی خط می‌شود و بارهای آزاد خط از طریق مقاومت نشستی آن به سمت زمین شارش می‌یابند، در این زمان میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه محاسبه می‌شود. در سال ۱۹۲۹ بویلی تئوری واگنر را با در نظر گرفتن اینکه میدان القایی به سرعت از بین نمی‌رود و زمان کوتاهی برای از بین رفتن میدان مورد نیاز می‌باشد، بهبود بخشیده و بعد از آن در سال ۱۹۳۵ ایگنر با در نظر گرفتن ملاحظات اثر القایی، مسیر عمودی صاعقه را نیز در نظر گرفته است. در سال ۱۹۵۸ راسک با پیشنهاد یک عبارت تقریبی اضافه ولتاژ القایی بر روی خطوط هوایی ولتاژ بالا و متوسط را محاسبه نموده است [۵] که این کار نقطه عطفی در این موضوع می‌باشد. بعد از این محققان و دانشمندان تاکنون مطالعات زیادی را در ارتباط با این موضوع انجام داده و سعی نموده‌اند هر چه بیشتر ابعاد پنهان این پدیده را آشکار سازند که در این فصل مطالبی در ارتباط با معرفی این اقدامات صورت گرفته، گردآوری شده است. در ادامه این فصل مشاهده خواهد شد که با گذشت زمان و پژوهش‌های صورت گرفته روند حرکتی این موضوع چگونه بوده است.

۲-۳- ضربه برگشتی صاعقه

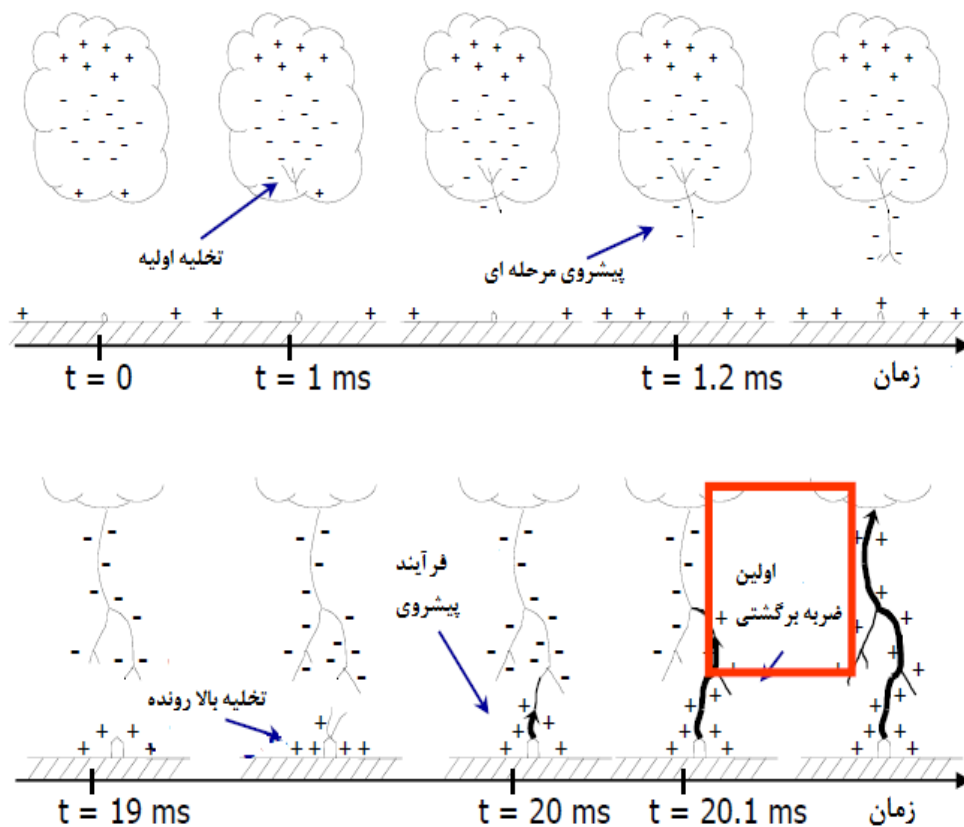
موقع شکل‌گیری پدیده تخلیه الکتریکی هنگامی که میدان الکتریکی در اطراف توده ابر منفی به حدود 10 kV/cm برسد، گذرهای (نهرهای) یونیزه شده‌ای از ابر به طرف زمین جاری می‌شود. این میدان الکتریکی بحرانی برابر شدت میدانی است که در آن هوای اطراف این توده ابر شکست پیدا می‌کند. البته اغلب حرکت این گذرهای الکتریکی در فاصله کوتاهی از ابرها به دو دلیل متوقف می‌شود.

۱- بارهای موجود در گذر الکتریکی توسط بارهای مثبت پراکنده خنثی می‌شوند.

۲- توده‌های باری که این گذر از دل آن بیرون می‌آید آن قدر پربار نیست که آنها را تا نزدیکی‌های زمین به جلو براند.

پیشروی نهر به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود و حدود $40 \mu\text{s}$ پس از گسترش اولین نهر، دومین نهر حرکت می‌کند که دقیقاً از همان مسیر یونیزه شده نهر اول پیش می‌رود، انتهای این مرحله، نهر تا فاصله بیشتری به طرف زمین گسترش می‌یابد. معمولاً این‌طور در نظر گرفته می‌شود که در هر پیشروی کانال صاعقه حدود 50 متر به زمین نزدیک‌تر می‌شود [۶]. به همین دلیل است که این پیشروی را مرحله‌ای می‌گویند.

در مراحل فوق مقدار زیادی از بارهای الکتریکی از ابرها در درون این نهر و شاخه‌های اطرافش توزیع می‌شود. عاقبت زمانی که انتهای نهر به حدود 15 تا 50 متری سطح زمین می‌رسد، شدت میدان الکتریکی در سطح زمین به مقدار کافی بزرگ می‌شود به طوری که باعث حرکت بارها از سطح زمین به طرف بالا و بستن فاصله موجود می‌شود. در این موقع جریان الکتریکی بسیار زیادی با سرعت از زمین به طرف بالا بر روی مسیرهای یونیزه شده حرکت کرده و بارهای موجود بر روی نهر و شاخه‌های الکتریکی را خنثی می‌نماید. این جریان خنثی‌کننده، جریان برگشتی و خود عمل، ضربه برگشتی نامیده می‌شود. قدرت این جریان در بعضی مواقع به حدود 200 kA می‌رسد ولی در مراجع معتبر مقدار آن را به طور میانگین برابر 20 kA در نظر می‌گیرند [۷]. در شکل ۱-۲ چگونگی تشکیل ضربه برگشتی صاعقه نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) چگونگی تشکیل ضربه برگشتی صاعقه

۲-۳-۱- مدل های ضربه برگشتی صاعقه

با یک مرور جامع بر روی تمامی مدل های جریان ضربه برگشتی صاعقه می توان در حالت کلی آنها را به چهار دسته تقسیم نمود [۸].

۱- مدل فیزیکی یا دینامیک گازی، اصول این مدل ها مربوط به ارزیابی شعاعی یک قسمت کوچک کانال صاعقه می باشد و خواص آن شبیه امواج ضربه می باشد.

۲- مدل های مدار توزیع شده که می توان آنها را به صورت مدارهای الکترومغناطیسی تقریبی، که در بالا توصیف شد در نظر گرفت. در این مدل ها تخلیه صاعقه به صورت یک فرآیند گذرا بر روی خط انتقال عمودی با مقاومت (R)، اندوکتانس (L) و کاپاسیتانس (C) بر واحد طول در نظر گرفته می شود.

۳- مدل‌های مهندسی که توزیع فضایی- زمانی جریان کانال (یا چگالی بار کانال) را بر پایه مشخصه‌های ضربه برگشتی صاعقه همچون جریان کانال پایه، سرعت انتشار به سمت بالا و شکل کانال توصیف می‌کند.

۴- مدل‌های الکترومغناطیسی که معمولاً بر پایه تقریب کانال صاعقه به وسیله یک آنتن سیم نازک پر اتلاف می‌باشد. این مدل‌ها در برگیرنده حل عددی معادلات ماکسول برای پیدا کردن توزیع جریان در طول کانال صاعقه می‌باشد. می‌توان به وسیله این مدل‌ها میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را از راه دور محاسبه کرد و تاکنون دقیق‌ترین مدل معرفی شده برای مدل کردن کانال صاعقه در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری می‌باشد.

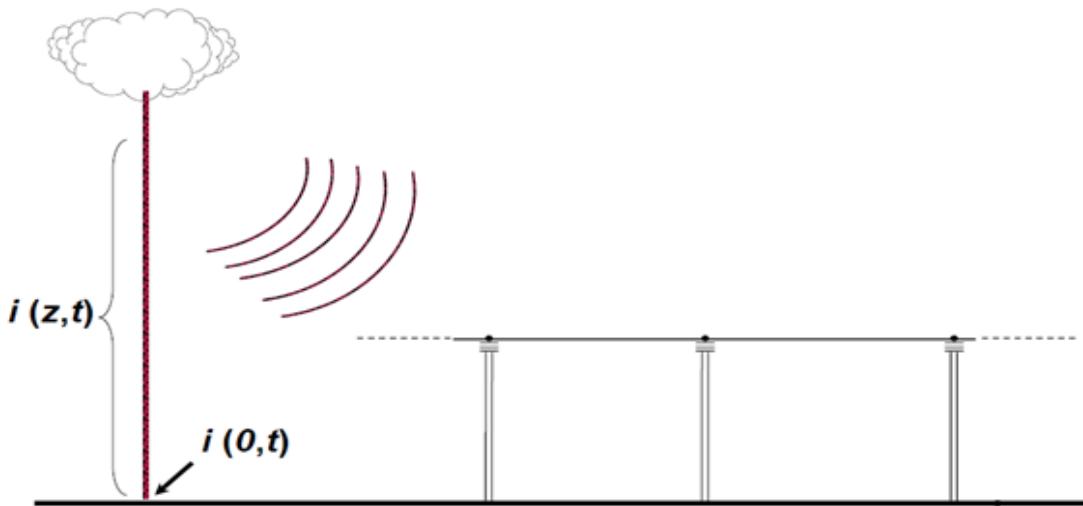
مدل دینامیک گازی اصولاً برای تولید دوباره پارامترهای فیزیکی ضربه برگشتی استفاده می‌شود. سایر مدل‌ها اساساً برای تولید میدان‌های الکترومغناطیسی حاصل از ضربه برگشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه ابتدا به این دلیل که بیشتر شیوه‌های معرفی شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه بر پایه مدل مهندسی بنا شده‌اند، در این فصل به معرفی مدل مهندسی کانال صاعقه پرداخته می‌شود و در فصل سوم مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

یک مدل مهندسی برای جریان ضربه برگشتی، یک مشخصه ریاضی توزیع مکان - زمان جریان در طول کانال صاعقه $i(z',t)$ یا چگالی بار در طول کانال $\rho(z',t)$ می‌باشد. این مشخصه ریاضی شامل: سرعت جبهه موج ضربه برگشتی به عنوان یکی از ورودی‌های مدل، توزیع بار در طول کانال و تعدادی پارامترهای قابل تنظیم مربوط به پدیده تخلیه می‌باشد، که باید به وسیله مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شوند. خروجی این مدل‌ها می‌تواند به طور مستقیم برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده شود. در این مدل‌ها عموماً کانال صاعقه مستقیم و به صورت عمود بر سطح هادی زمین در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲-۲ شمای هندسی مدل مهندسی کانال صاعقه و نحوه تزویج آن با خطوط هوایی نشان داده شده است.

از نقطه نظر مهندسی مناسب‌ترین مدل جریان ضربه برگشتی $i(z',t)$ مدلی است که بتوان آن را به جریان کانال پایه $i(0,t)$ ارتباط داد، زیرا فقط جریان کانال پایه به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود و اطلاعات آزمایشگاهی و تجربی درباره آن در دسترس می‌باشد. به این منظور، بیشتر

مدل‌های مهندسی ارائه شده در مقالات مشخصه ریاضی توزیع مکان - زمان جریان صاعقه در طول کانال را به صورت رابطه (۱-۲) بیان می‌کنند.

$$i(z',t) = u \left(t - \frac{z'}{v_f} \right) P(z') i \left(0, t - \frac{z'}{v} \right) \quad (1-2)$$



شکل (۲-۲) مدل مهندسی کانال صاعقه و نحوه توزیع آن با خطوط هوایی

در رابطه (۱-۲)، u تابع پله، v_f سرعت جبهه موج^۱ (سرعت ضربه برگشتی)، v سرعت انتشار جریان ضربه برگشتی^۲ و $P(z')$ تابع میرا کننده جریان ضربه برگشتی در طول کانال می‌باشد. مدل‌های جریان کانال پایه ($i(0,t)$) ارائه شده در مقالات در ادامه این فصل بیان می‌گردد. همچنین عبارات معادل بر حسب چگالی بار $\rho(z',t)$ بر روی کانال به وسیله معادلات پیوستگی زیر ارائه می‌شود. در واقع رابطه معادله پیوستگی چگالی بار در واحد طول $\rho_L^*(z',t)$ در ارتفاع z' و جریان $i^*(z',t)$ در کانال صاعقه عمودی در زمان دلخواه t' به صورت رابطه (۲-۲) می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho_L^*(z',t')}{\partial t'} = - \frac{\partial i^*(z',t')}{\partial z'} \quad (2-2)$$

علامت ستاره نشان دهنده این می‌باشد که متغیرها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در همه جا غیر صفر می‌باشند. حال به دلیل اینکه چگالی بار و جریان در بالای پیشانی ضربه برگشتی وجود ندارد، می‌توان $i^*(z',t')$ و $\rho_L^*(z',t')$ را به صورت روابط (۲-۳) و (۲-۴) نوشت.

¹ Upward-propagation front speed

² Currant-wave propagation speed

$$i^*(z', t') = u \left(t - \frac{z'}{v} \right) i(z', t') \quad (3-2)$$

$$\rho_L^*(z', t') = u \left(t - \frac{z'}{v} \right) \rho_L(z', t') \quad (4-2)$$

اکنون با جاگذاری (۲-۲)، (۳-۲) و (۴-۲) در (۱-۲) رابطه (۵-۲) به دست می‌آید.

$$u \left(t' - \frac{z'}{v} \right) \frac{\partial \rho_L(z', t')}{\partial t'} + \delta \left(t' - \frac{z'}{v} \right) \rho_L(z', t') = -u \left(t' - \frac{z'}{v} \right) \frac{\partial i(z', t')}{\partial z'} + \delta \left(t' - \frac{z'}{v} \right) \frac{1}{v} i(z', t') \quad (5-2)$$

برای $t' \geq \frac{z'}{v}$ تابع پله برابر واحد و تابع دلتا برابر صفر می‌باشد، پس می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \rho_L(z', t')}{\partial t'} = - \frac{\partial i(z', t')}{\partial z'} \quad (6-2)$$

حال با انتگرال‌گیری از دو طرف معادله (۶-۲) از $-\infty$ تا $t' \geq \frac{z'}{v}$ رابطه (۷-۲) به دست می‌آید.

$$\int_{z'/v}^{t'} \frac{\partial \rho(z', \tau)}{\partial \tau} d\tau + \rho \left(z', \frac{z'}{v} \right) = \int_{z'/v}^{t'} \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial \tau} d\tau + \frac{i(z', z'/v)}{v} \quad (7-2)$$

اکنون اگر $t' = \frac{z'}{v}$ ، آنگاه عبارت انتگرال در معادله (۵-۲) برابر صفر می‌شود و معادله پیوستگی به صورت رابطه (۸-۲) بدست می‌آید.

$$\partial \rho \left(z', \frac{z'}{v} \right) = \frac{i(z', z'/v)}{v} \quad (8-2)$$

همچنین چون z' و t' تغییرهای مستقل می‌باشند عبارت اول سمت چپ معادله (۵-۲) را می‌توان به صورت رابطه (۹-۲) نوشت.

$$\int_{z'/v}^{t'} \frac{\partial \rho(z', \tau)}{\partial \tau} d\tau = \int_{z'/v}^{t'} d\rho_L(z', \tau) = \rho_L(z', t') - \rho_L(z', z'/v) \quad (9-2)$$

حال با جاگذاری (۲-۲) در (۵-۲)، رابطه (۱۰-۲) به دست می‌آید.

$$\rho_L(z', t') = \frac{i(z', z'/v)}{v} - \int_{z'/v}^{t'} \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} d\tau \quad (10-2)$$

با جاگذاری t' با t در معادله (۱۰-۲) رابطه (۱۱-۲) بدست می‌آید.

$$\rho_L(z', t') = \frac{i(z', z'/v)}{v} - \int_{z'/v}^t \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} d\tau \quad (10-2)$$

در حالت کلی چگالی بار به دو مؤلفه تجزیه می‌شود، یکی وابسته به بار منتقل شده از طریق یک قسمت معین کانال (مؤلفه‌ای که بعد از کامل شدن جریان برگشتی ناپدید می‌شود) و مؤلفه دیگر وابسته به بار باقی مانده در اثر ضربه برگشتی این بخش کانال می‌باشد. در معادله (۹-۲) مؤلفه اول مربوط به چگالی بار باقی مانده و مؤلفه دوم مربوط به هر دو بخش می‌تواند باشد. در برخی از مدل‌های جریان ضربه برگشتی یکی از این دو مؤلفه وجود ندارد. با استفاده از فرمول لاینیتز در معادله (۹-۲) این‌طور به دست می‌آید که:

$$\rho_L(z', t') = -\frac{d}{dz'} \int_{z'/v}^t \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} d\tau = -\frac{dQ(z', \tau)}{dz'} \quad (11-2)$$

که $Q(z', \tau)$ بار کانال در ارتفاع z' و زمان t می‌باشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته رایج‌ترین مدل‌های مهندسی جریان ضربه برگشتی صاعقه برای محاسبات اضافه ولتاژ القا شده پنج نوع می‌باشد [۹].

- ❖ مدل بروس و گولد^۱ (BG)
 - ❖ مدل منبع جریان سیار^۲ (TCS)
 - ❖ مدل خط انتقال^۳ (TL) پیشنهاد شده به وسیله یومن^۴ و مک لاین
 - ❖ مدل خط انتقال اصلاح شده^۵ (MTL) با میرایی جریان خطی پیشنهاد شده توسط راکف
 - ❖ مدل خط انتقال اصلاح شده (MTL) با میرایی نمایی پیشنهاد شده توسط نویس
- این پنج مدل رایج و پرکاربرد در جدول (۱-۲) به صورت خلاصه بیان شده‌اند. در این جدول مطابق رابطه (۱-۲) مقدار سرعت انتشار جریان ضربه برگشتی (v) و تابع میرایی جریان در طول کانال ضربه برگشتی ($P(z')$) برای هر مدل مشخص شده است.

¹ Bruce and Gold

² Travel current source

³ Transmission line

⁴ Uman

⁵ Modified Transmission line

جدول (۱-۲) مشخصات مربوط به مدل‌های ضربه برگشتی صاعقه [۹]

نام مدل	$P(z')$	V
بروس و گولد	۱	∞
منبع جریان سیار	۱	$-C$
هایدلر	۱	V_f
خط انتقال اصلاح شده با میرایی جریان خطی	$1 - z' /H$	V_f
خط انتقال اصلاح شده با میرایی نمایی	$\exp(- z' /\lambda)$	V_f

در جدول (۱-۲) H طول کانال صاعقه، λ ثابت میرایی جریان در طول کانال صاعقه و C سرعت نور می‌باشد.

۲-۳-۲- جریان کانال پایه

جریان کانال پایه در برخی کشورها به وسیله تجهیزات نصب شده بر روی دکل‌ها اندازه‌گیری و جزئیات آماری اطلاعات آن ارائه شده است [۱۰]. در مورد جریان صاعقه معمولاً ضربات مثبت نسبت به ضربات منفی از فراوانی و حداکثر شیب جریان کمتری برخوردار می‌باشند و به همین دلیل در مطالعات فقط برخورد صاعقه با پلاریته منفی در نظر گرفته می‌شود. برای شکل موج جریان کانال پایه چندین مدل پذیرفته و در مقالات برای مدل‌سازی ضربه برگشتی صاعقه استفاده شده است. در ادامه چندین مدل رایج ارائه شده برای جریان کانال پایه معرفی می‌گردد.

۱-۲-۳-۲- مدل بروس و گولد (BG)

جریان کانال پایه پیشنهاد شده در این مدل به شکل نمایی دویل می‌باشد. در واقع عبارتی که بروس و گولد برای جریان کانال پایه برای ضربه برگشتی اولیه و ثانویه پیشنهاد کرده‌اند به صورت روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) می‌باشد.

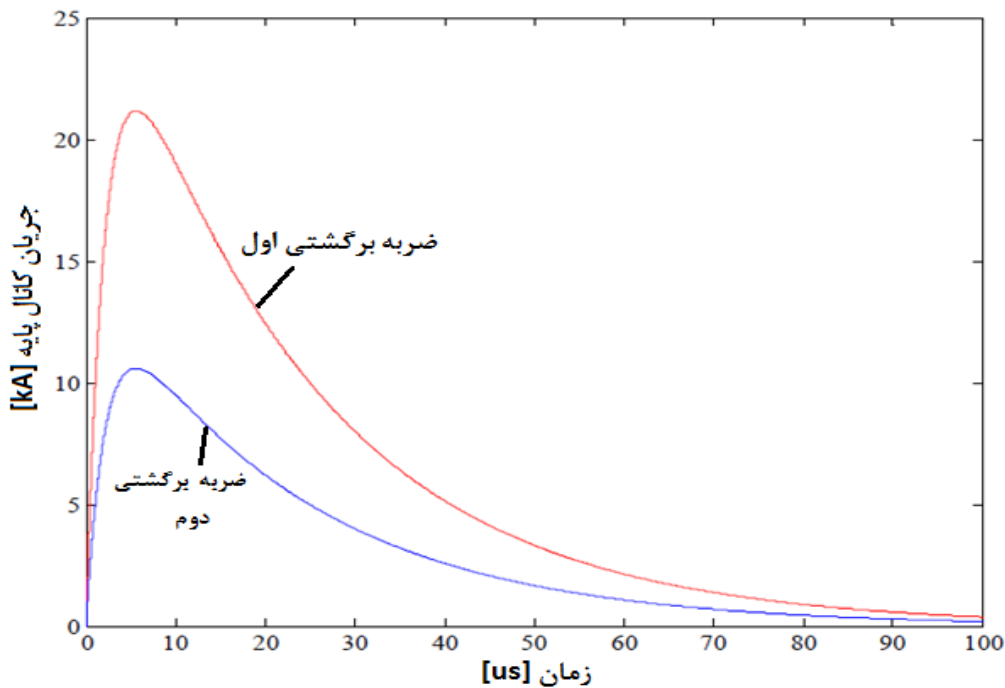
¹ Bruce and Golde

$$i_{first}(0,t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (12-2)$$

$$i_{second}(0,t) = \frac{I_0}{2}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (13-2)$$

I_0 حداکثر مقدار جریان کانال پایه می باشد.

مقادیر پارامترهای معادلات (12-2) و (13-2) در جدول (2-2) درج گردیده است و شکل (3-2) تصویر موج جریان کانال پایه پیشنهادی به وسیله بروس و گولد را نشان می دهد.



شکل (3-2) شکل موج جریان کانال پایه مدل بروس و گولد [9]

2-3-2-2-مدل پیرس و کیانوس (PC)

پیرس مدلی شبیه BG (بروس و گولد) اما با مقادیر متفاوت برای I_0 ، α و β پیشنهاد کرده است، مقادیر پیشنهادی در جدول (2-2) درج شده است. علاوه بر این در مدل جریان جدید، یک مؤلفه جریان ثانویه به معادله (12-2) برای ضربه برگشتی اولیه اضافه می شود، که این مؤلفه دارای شکل

¹ Pierce and Cianos

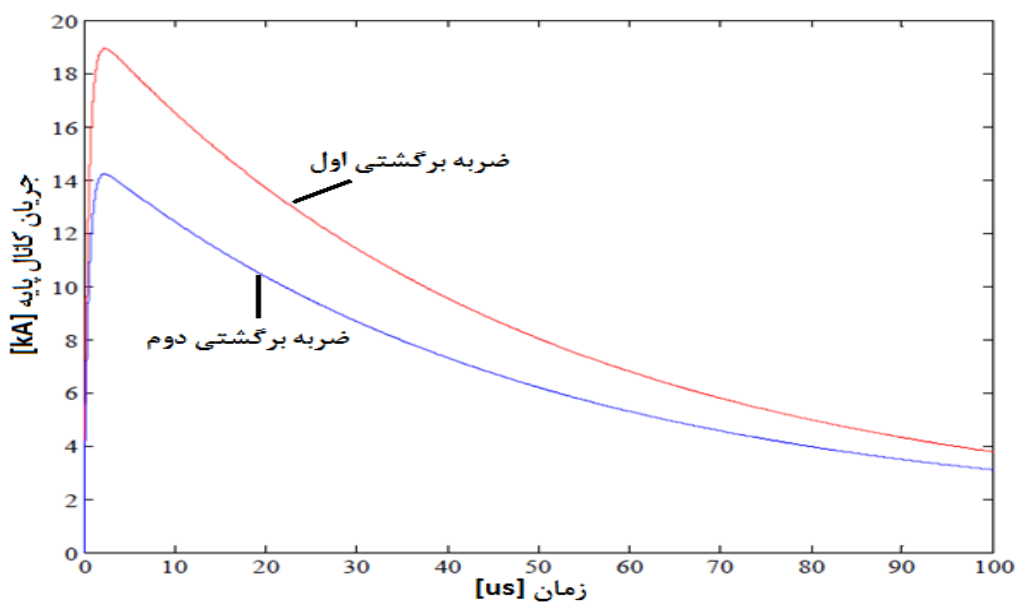
موج نمایی دوبر می‌باشد و شکل موج واقعی تری را برای جریان ارائه می‌دهد. تابع معرفی شده برای این مدل به صورت رابطه (۲-۱۴) می‌باشد.

$$i_{first}(0,t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{oi}(e^{-\gamma t} - e^{-\delta t}) \quad (2-14)$$

مقادیر پارامترهای I_0 ، α و β در جدول (۲-۲) درج شده است. برای ضربات برگشتی ثانویه نیز همین اصلاح به کار رفته و مقادیر پیشنهادی برای پارامترها در جدول (۲-۲) درج شده است. شکل (۲-۴) تصویر موج جریان کانال پایه پیشنهادی به وسیله پیرس و کیالون (PC) برای ضربه اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۲) مقادیر پارامترهای جریان کانال پایه [۹]

پارامتر	مدل	ضربه اول		ضربه ثانویه	
		BG	PC	BG	PC
$I_0 (kA)$		۳۰	۲۰	۱۵	۱۰
$I_{oi} (kA)$		-	۲	-	۲
$\alpha [s^{-1}]$		$4/4 \times 10^4$	2×10^4	$4/4 \times 10^4$	2×10^4
$\beta [s^{-1}]$		$4/6 \times 10^5$	2×10^6	$4/6 \times 10^5$	2×10^6
$\gamma [s^{-1}]$		-	10^3	-	10^3
$\delta [s^{-1}]$		-	10^3	-	10^4



شکل (۲-۴) موج جریان کانال پایه مدل پیرس و کیالون [۹]

شایان ذکر است که هر دو مدل BG و PC دارای شکل موج جریان کانال پایه با تحدب غیرواقعی و حداکثر مشتق جریان در $t=0$ می‌باشند.

۳-۲-۳-۲- مدل هایدلر :

این مدل شکل موج نوعی جریان کانال را با تقعر در بخش صعود کننده تولید می‌کند، یعنی در این مدل برخلاف مدل نمایی دوپل که قبلاً بیان شد هیچ ناپیوستگی در مشتق جریان دیده نمی‌شود. تابع معرفی شده برای این مدل به صورت رابطه (۱۵-۲) می‌باشد.

$$i(O,t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (15-2)$$

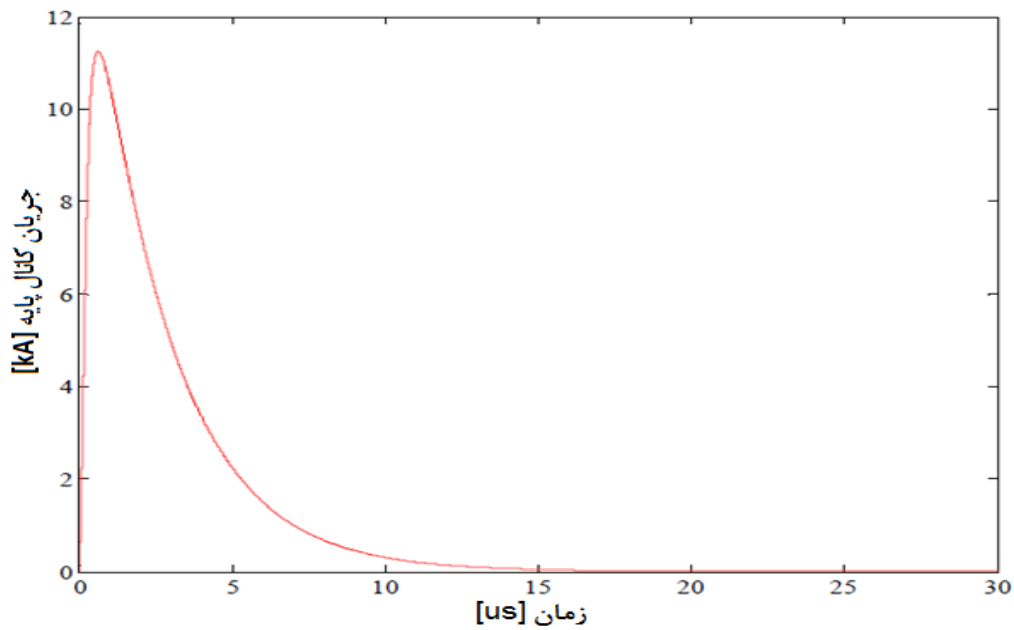
$$\eta = \exp\left[\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right] \quad (16-2)$$

τ_1 ثابت زمانی پیشانی موج، τ_2 زمان پشت موج، n عدد صحیح در محدوده ۲ تا ۱۰ و I_0 حداکثر دامنه جریان کانال پایه می‌باشد. معادله (۱۵-۲) به راحتی اجازه تغییرات و تنظیمات حداکثر جریان، حداکثر مشتق جریان و بار الکتریکی انتقالی به صورت مستقل و به ترتیب I_0 ، τ_1 و τ_2 را می‌دهد.

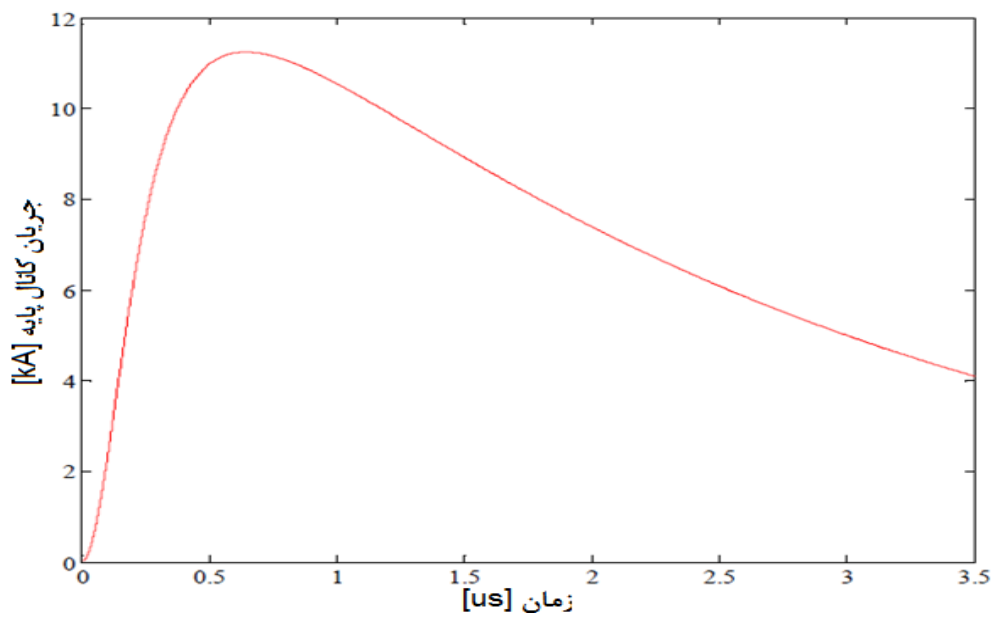
در جدول (۳-۲) مقادیر نوعی پارامترهای I_0 ، τ_1 و τ_2 درج گردیده و جریان کانال پایه متناظر در شکل (۵-۲) رسم شده است. در شکل (۶-۲) جریان برای بازه زمانی ابتدایی نشان داده شده است. در این شکل تقعر قسمت صعود کننده جریان به وضوح دیده می‌شود. همچنین باید توجه کرد که با تغییرات I_0 ، τ_1 و τ_2 ضربه برگشتی ثانویه نیز می‌تواند مدل‌سازی شود.

جدول (۳-۲) مقادیر پارامترهای جریان کانال پایه پیشنهادی توسط هایدلر [۹]

$I_0(kA)$	$\tau_1(\mu s)$	$\tau_2(\mu s)$	n
۱۰/۷	۰/۲۵	۲/۵	۲



شکل (۵-۲) شکل موج جریان کانال پایه مدل هایدلر [۹]

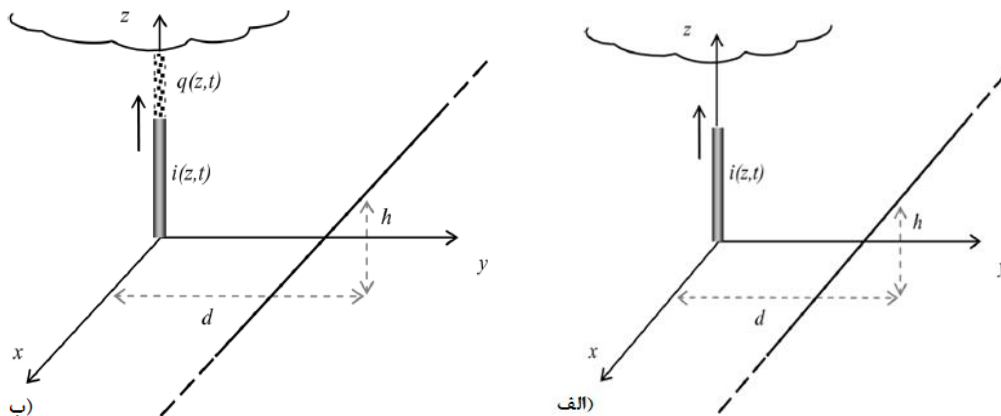


شکل (۶-۲) شکل موج جریان کانال پایه مدل هایدلر برای بازه زمانی ابتدایی [۹]

لازم به ذکر است مدل معرفی شده توسط آقای هایدلر، پرکاربردترین مدل جریان کانال صاعقه در مطالعات مربوط به اضافه ولتاژ القایی صاعقه می باشد.

۲-۴- روش‌های محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی

صاعقه یکی از عوامل مهم اختلالات مؤثر بر کیفیت منبع تغذیه می‌باشد. به ویژه صاعقه غیرمستقیم می‌تواند باعث خطای دائمی یا گذرا در خطوط توزیع هوایی گردد. از آنجا که مشکلات برای مشترکین به وجود می‌آید و از آنجا که حساسیت برخی از بارها ممکن است خیلی شدید باشد، حتی برای خطاهای گذرا داشتن دانش کافی از پدیده صاعقه غیرمستقیم یک امر ضروری می‌باشد [۱۱]. تلاش‌های صورت گرفته در ارتباط با اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه قابل توجه می‌باشد. به ویژه روش‌های عددی زیادی برای ارزیابی ولتاژهای القایی روی خطوط هوایی پیشنهاد شده‌اند. روش‌های عددی قادرند این پدیده را مدل کنند یعنی می‌توانند شکل موج ضربه برگشتی، تأثیرات رسانایی محدود زمین و رفتار غیر ایده آل خطوط هوایی را مدل کرده و همچنین وسایل غیرخطی مثل برقگیرها را نیز در نظر بگیرند. راه‌حل‌های تحلیلی، هم در فاز طراحی و هم در ارزیابی پارامتری و آنالیز حساسیت خیلی مهم می‌باشند. علاوه بر این راه‌حل‌های تحلیلی بینش قابل توجهی از این پدیده را فراهم می‌آورند که اغلب در روش‌های عددی پنهان می‌مانند. به طور کلی با توجه به پیچیدگی این پدیده روش‌های تحلیلی می‌توانند فقط برای مدل‌های ساده ولتاژ القایی صاعقه به کار گرفته شوند. دو مدل شماتیکی در ادبیات مربوط به این بحث بسیار پرکاربرد و محبوب می‌باشند که در شکل ۲-۷ نشان داده شده‌اند. هر دو مدل به یک میدان الکترومغناطیسی و یک خط انتقال هوایی منفرد بدون تلفات که در حضور زمین با رسانایی کامل (زمین بدون تلفات) عمل می‌کند اشاره می‌نمایند.



شکل (۲-۷) مدل کانال صاعقه: (الف) بدون بار اولیه (ب) با بار اولیه [۱۷]

در شکل ۲-۷-الف جریان صاعقه در راستای کانال صاعقه که هیچ‌گونه بار الکتریکی در آن وجود ندارد، حرکت می‌کند. در حالیکه در شکل ۲-۷-ب جریان در راستای کانال صاعقه حرکت می‌کند و بارهای باقی مانده در طول فاز نهر قبلی را خنثی می‌کند. اکثر راه‌حل‌های فرم بسته‌ای که تاکنون برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی ارائه شده‌اند با در نظر گرفتن این دو مدل به دست آمده‌اند. به عنوان مثال اولین و مهم‌ترین آنها مدل راسک می‌باشد که به مدل شکل ۲-۷-ب اشاره دارد [۱۲]. مدل ارائه شده توسط راسک خیلی مهم می‌باشد چرا که در استاندارد IEEE 1410 مورد استفاده قرار گرفته است. چادوری - گروس [۱۳] و لیو-مایر [۱۴] نیز راه‌حل فرم بسته دیگری را برای مدل شکل ۲-۷-ب ارائه داده‌اند. همچنین هیودالن راه‌حلی ارائه داده است که به مدل شکل ۲-۷-الف اشاره دارد [۱۵]. A. Ancajima و همکارانشان [۱۶] نیز در مطالعه خود، بر روی موج ولتاژ القایی صاعقه که دارای زمان پشت کوتاه‌تری نسبت به موج ولتاژ ناشی از ضربات مستقیم صاعقه (معرفی شده در استانداردها) می‌باشد، تمرکز کرده‌اند. در ادامه به معرفی این روش‌های تحلیلی پرداخته شده است.

۲-۴-۱- فرمول راسک^۱:

راه‌حل تحلیلی ارائه شده توسط راسک، که به مدل شکل ۲-۷-ب اشاره دارد، با شروع از یک مدل تزویج توسعه یافته که توسط خود راسک معرفی شده است (به عنوان مدل تزویج راسک شناخته می‌شود)، به دست می‌آید. معادلات تزویج راسک به صورت روابط (۲-۱۷) و (۲-۱۸) می‌باشند.

$$\frac{\partial v^\phi(x,t)}{\partial x} + \ell' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2-17)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + c' \frac{\partial v^\phi(x,t)}{\partial t} = c' \frac{\partial \phi^i(x,d,h,t)}{\partial t} \quad (2-18)$$

¹ Rusck formula

در روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲) v^ϕ ولتاژ القا شده در خط ناشی از پتانسیل عددی میدان حادث شده و ϕ^i پتانسیل عددی میدان حادث شده می‌باشد. ولتاژ کلی روی خط از رابطه (۱۹-۲) به دست می‌آید.

$$v(x,t) = v^\phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t} dz \quad (19-2)$$

در رابطه (۱۹-۲) A_z^i جزء عمودی بردار پتانسیل میدان حادث شده می‌باشد. اعتبار مدل تزویج راسک توسط Cooray مورد تحقیق قرار گرفته است. او مدل تزویج راسک را با مدل موج آنتن^۱ (مدل Agrawal و...) مقایسه کرده است. ابتدا برای اینکه دو مدل در یک قالب مقایسه شوند، مدل موج آنتن را در شرایط پتانسیل برداری و عددی نوشته و دریافته است که در مدل راسک یکی از شرایط اعمالی یعنی $\partial A_x^i(x,d,h,t)/\partial t$ اشتباه می‌باشد.

مدل راسک قسمت میدان الکتریکی افقی تولید شده توسط گرادیان پتانسیل عددی را در محاسبات به حساب می‌آورد ولی از سهم پتانسیل برداری غفلت می‌نماید. این نقص در مدل راسک آن را وابسته به منبع می‌سازد. یعنی مدل راسک می‌تواند منجر به نتایج دقیقی شود فقط وقتی که میدان الکترومغناطیسی‌ای که تولید می‌نماید چنان باشد که سهم پتانسیل برداری برای میدان افقی یا صفر باشد یا بتوان از آن صرف نظر کرد و این شرایط وقتی که کانال صاعقه عمودی باشد محقق می‌گردد. یعنی سهم پتانسیل برداری در این شرایط صفر می‌باشد.

برای حل معادلات (۱۷-۲) و (۱۸-۲) و سپس استفاده از (۱۹-۲)، راسک تقریب ذیل را ایجاد کرده است:

$$\int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t} dz \cong h \frac{\partial A_z^i(x,d,0,t)}{\partial t} \quad (20-2)$$

رابطه (۲۰-۲) بدین معنی است که قسمت عمودی پتانسیل برداری میدان حادث شده (A_z^i) ، در بازه ارتفاعی $[0,h]$ ثابت در نظر گرفته شده و تنها در ارتفاع صفر مورد ارزیابی قرار گرفته است. یک تقریب دیگر راسک به صورت رابطه (۲۱-۲) می‌باشد.

$$\phi^i(x,d,h,t) = \int_0^h e_z^{\phi^i}(x,d,z,t) dz \cong h e_z^{\phi^i}(x,d,0,t) \quad (21-2)$$

¹ Wave Antenna Model

در رابطه (۲۱-۲) $e^{\frac{0}{z}t}$ میدان الکتریکی عمودی حادث شده به علت فقط پتانسیل عددی می باشد. فرمول راسک بعد از حل معادلات (۱۷-۲) و (۱۸-۲) و استفاده آنها در (۱۹-۲) به پایان می رسد. در نهایت راه حل فرم بسته ارائه شده توسط راسک برای محاسبه ولتاژ القا شده در خط هوایی به صورت رابطه (۲۹-۲) می باشد.

$$v(x,t) = \frac{\zeta_0 I_0 h \beta}{4\pi} \times \left[\frac{ct-x}{d^2 + \beta^2(ct-x)^2} \left(1 + \frac{x + \beta^2(ct-x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\gamma^2}} \right) + \frac{ct+x}{d^2 + \beta^2(ct+x)^2} \left(1 + \frac{x + \beta^2(ct+x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\gamma^2}} \right) \right] \quad (22-2)$$

معادله (۲۲-۲) برای $t > \sqrt{x^2 + d^2}/c$ معتبر در نظر گرفته شده است. راسک همچنین برای ولتاژ القا شده در نقطه نزدیک ضربه صاعقه ($x=0$) نیز رابطه (۲۳-۲) را ارائه نموده است.

$$v(0,t) = \frac{\zeta_0 I_0 h}{4\pi d^2} \frac{2\beta ct}{1 + (\beta ct/d)^2} \times \left(1 + \beta^2 \frac{ct/d}{\sqrt{1 + \beta^2 \left[\left(\frac{ct}{d} \right)^2 - 1 \right]}} \right) \quad (23-2)$$

رابطه (۲۳-۲) نیز برای $t > d/c$ معتبر در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۲- فرمول چادوری - گروس^۱

راه حل تحلیلی ارائه شده توسط چادوری - گروس که اشاره به شکل ۲-۷-ب دارد، با شروع از یک مدل تزویج توسعه یافته که معروف به مدل تزویج چادوری - گروس است، شروع می شود. معادلات تزویج چادوری گروس به صورت روابط (۲۴-۲) و (۲۵-۲) می باشد.

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + \ell \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (24-2)$$

¹ Chowdhuri-Gross Formula

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + c' \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = c' \frac{\partial v_i(x,t)}{\partial t} \quad (25-2)$$

چادوری - گروس برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی رابطه (26-2) را ارائه نموده‌اند.

$$v_i(x,t) = -\int_0^h e_z^i(x,d,z,t) dz = \int_0^h (\nabla_z \phi^i(x,d,z,t) + \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t}) dz \quad (26-2)$$

در رابطه (26-2) ϕ^i پتانسیل عددی و A_z^i قسمت عمودی از پتانسیل برداری حادث شده است. اعتبار مدل تزویج چادوری - گروس توسط Nuuci مورد تحقیق قرار گرفته است. مدل موج آنتن را با مدل چادوری - گروس مقایسه نموده است و نشان می‌دهد که در مدل چادوری - گروس عبارت منبع $-(\partial/\partial t) \int_0^h b_y^i(x,d,z,t) dz$ که در آن قسمت y میدان مغناطیسی حادث شده است، در توصیف تزویج الکترومغناطیسی بین میدان حادث شده و خط اشتباه می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد که این غفلت می‌تواند منجر به اشتباهات قابل توجهی در شرایط خاص شود. چادوری و همکارانش در پاسخ به این نتایج اعلام نموده‌اند که یک مقایسه مستقیم از مدل موج آنتن و مدل چادوری - گروس نباید صورت گیرد چرا که این دو روش شبیه سازی که به ترتیب اشاره به یک کانال بدون بار و کانال با بار اولیه (به ترتیب شکل 2-7-الف و 2-7-ب) دارند کاملاً متفاوت می‌باشند.

چادوری و گروس برای حل معادلات تزویج (24-2) و (25-2) تقریب زیر را به کار گرفته‌اند.

$$v_i(x,t) = -\int_0^h e_z^i(x,d,z,t) dz \cong -he_z^i(x,d,0,t) \quad (27-2)$$

در عبارت (27-2) e_z^i قسمت عمودی میدان الکتریکی حادث شده می‌باشد که میدان الکتریکی القایی نامیده می‌شود. فرمول چادوری - گروس پس از انتگرال‌گیری به کمک تبدیل لاپلاس از معادلات (24-2) و (25-2) به پایان می‌رسد و رابطه نهایی ارائه شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی به صورت رابطه (28-2) می‌باشد.

$$v(x,t) = \begin{cases} 0 & t < t_1^* \\ v_{11} + v_{12} + v_{21} + v_{22} & t \geq t_1^* \end{cases} \quad (28-2)$$

$$t_1^* = \sqrt{x^2 + d^2} / c \quad \text{و}$$

در رابطه (۲۸-۲) عبارتهای $v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}$ به صورت روابط (۲۹-۲) تا (۳۲-۲) تعریف می-گردند.

$$v_{11} = \frac{30I_0 h(1-\beta^2)}{\beta^2(ct-x)^2 + d^2} \times \left[\beta(ct-x) + \frac{(ct-x)-d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{x^2+d^2}{\beta^2\gamma^2}}} \right] \quad (29-2)$$

$$v_{12} = \frac{-30I_0 h}{\beta} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \right) \frac{1}{ct-x} \quad (30-2)$$

$$v_{21} = \frac{30I_0 h(1-\beta^2)}{\beta^2(ct+x)^2 + d^2} \times \left[\beta(ct+x) - \frac{(ct+x)+d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{x^2+d^2}{\beta^2\gamma^2}}} \right] \quad (31-2)$$

$$v_{22} = \frac{-30I_0 h}{\beta} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \right) \frac{1}{ct+x} \quad (32-2)$$

در رابطه‌های (۲۹-۲) تا (۳۲-۲) مقادیر k_1 و k_2 از روابط (۳۳-۲) و (۳۴-۲) به دست می‌آیند.

$$k_1 = \frac{2h_c(ct-x)}{d^2 + (ct-x)^2} \quad (33-2)$$

$$k_2 = \frac{2h_c(ct+x)}{d^2 + (ct+x)^2} \quad (34-2)$$

رابطه (۲۸-۲) فرمول اولیه‌ای که توسط چادوری و گوس ارائه شده است، نمی‌باشد بلکه فرمولی است که توسط Cornfield مورد تصحیح قرار گرفته و توسط خود چادوری " تجزیه و تحلیل نهایی با اصلاح Cornfield " نامیده شده است و در مقالات به فرمول اصلاح شده چادوری - گروس معروف می‌باشد.

۲-۴-۳- فرمول لیو-مایر^۱

لیو و مایر مدل خود را با توجه به شکل ۲-۷-ب شروع کرده و در این مدل از معادلات تزویج (۲-۳۵) و (۲-۳۶) استفاده نموده‌اند.

$$\frac{\partial v^\phi(x,t)}{\partial x} + \ell' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + c' \frac{\partial v^\phi(x,t)}{\partial t} = c' \frac{\partial \phi^i(x,d,h,t)}{\partial t} \quad (2-36)$$

در روابط (۲-۳۵) و (۲-۳۶) v^ϕ ولتاژ القا شده در خط است که ناشی از پتانسیل عددی میدان حادث شده می‌باشد که آنها این عبارت را پتانسیل عددی القا شده نامیده‌اند و همچنین ϕ^i پتانسیل عددی میدان حادث شده می‌باشد. در نهایت لیو و مایر رابطه (۲-۳۷) را برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی در خط هوایی ارائه نموده‌اند.

$$v(x,t) = v^\phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t} dz \quad (2-37)$$

در رابطه (۲-۳۷) A_z^i جزء عمودی بردار پتانسیل میدان حادث شده می‌باشد. همچنین لیو و مایر عبارت $\int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t} dz$ را پتانسیل برداری القا شده نامیده‌اند. برای حل معادلات تزویج (۲-۳۵) و (۲-۳۶) لیو و مایر دقیقاً همان تقریبی که راسک استفاده نمود بود را به کار گرفته‌اند که به صورت رابطه (۲-۳۸) می‌باشد.

$$\int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,d,z,t)}{\partial t} dz \cong h \frac{\partial A_z^i(x,d,0,t)}{\partial t} \quad (2-38)$$

لیو و مایر در مطالعات خود علاوه بر تقریب رابطه (۲-۳۸) تقریب دیگری را نیز به کار برده‌اند که به صورت رابطه (۲-۳۹) می‌باشد.

¹ Liew-Mar Formula

$$\phi^i(x, d, h, t) = \int_0^h e_z^{\phi^i}(x, d, z, t) dz \cong h e_z^{\phi^i}(x, d, 0, t) \quad (39-2)$$

حل معادلات (۳۵-۲) و (۳۶-۲) توسط تبدیل لاپلاس صورت می‌گیرد و در نهایت رابطه (۴۰-۲) برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی ارائه گردیده است.

$$v(x, t) = \begin{cases} 0 & t < t_1^* \\ v_1 + v_2 & t \geq t_1^* \end{cases} \quad (40-2)$$

در رابطه (۴۰-۲) عبارت‌های v_1 و v_2 به صورت روابط (۴۱-۲) و (۴۲-۲) تعریف می‌گردند.

$$v_1 = \frac{30I_0 h}{\beta^2(ct-x)^2 + d^2} \left[\beta(ct-x) + \frac{(ct-x)x - d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{x^2 + d^2}{\beta^2 \gamma^2}}} \right] - \frac{30I_0 h}{\beta} \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \right) \frac{1}{ct-x} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \right) \frac{1}{ct+x} \right] + \frac{30I_0 h}{\beta^2(ct+x)^2 + d^2} \left[\beta(ct+x) - \frac{(ct+x)x + d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{x^2 + d^2}{\beta^2 \gamma^2}}} \right] \quad (41-2)$$

$$v_2 = \frac{60I_0 h}{\beta} \left[\frac{\beta^2}{\sqrt{(\beta ct)^2 - (x^2 + d^2) / \gamma^2}} \right] \quad (42-2)$$

در عبارات (۴۱-۲) و (۴۲-۲) $t_1^* = \sqrt{x^2 + d^2} / c$ می‌باشد. همچنین k_1 و k_2 نیز قبلاً با روابط (۳۳-۲) و (۳۴-۲) معرفی گردیده‌اند.

۲-۴-۴- فرمول هویدالن^۱

رابطه تحلیلی ارائه شده توسط هویدالن با استفاده از مدل تزویج موج آنتن به دست می‌آید که به شکل ۲-۷-الف اشاره دارد. روش هویدالن با روش‌هایی دیگری که تاکنون در زیربخش‌های ۲-۴-۱ تا ۲-۴-۳ ارائه شده کمی متفاوت می‌باشد چرا که این روش به خط انتقال با طول محدود اشاره

¹ Høidalen Formula

دارد و برای حالتی که یک طول مناسب از خط را مد نظر باشد مناسب است. برای حل معادلات تزویج، هویدالن تقریب‌های (۲-۴۳) و (۲-۴۴) را به کار گرفته است.

$$e_x^0(x, y, z, t) \cong \frac{\partial e_x(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} \times z \quad (۲-۴۳)$$

$$e_z(x, y, z, t) \cong e_z(x, y, z, t) \quad (۲-۴۴)$$

این تقریب‌ها بدین معناست که میدان الکتریکی افقی با جمله اول از بسط یک سری در $z = 0$ تقریب زده شده است و قسمت عمودی میدان الکتریکی نیز فقط در ارتفاع صفر مورد ارزیابی قرار گرفته و در بازه $[0, h]$ ثابت در نظر گرفته می‌شود.

مطالعات صورت گرفته توسط هویدالن با ارائه رابطه (۲-۴۵) برای محاسبه ولتاژ القایی در خط هوایی به پایان می‌رسد.

$$v(x, t) = \frac{\mu_0 c}{2\pi} I_0 \beta h f_0(x, t) \times \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t'_1 \\ f_1(x, t) + 1 & t'_1 \leq t < t'_2 \\ f_1(x, t) - f_1(x - L, t - \tau) & t \geq t'_2 \end{cases} \quad (۲-۴۵)$$

در رابطه (۲-۴۵) پارامترهای متفاوت به صورت زیر تعریف می‌گردند.

$$t'_1 = \sqrt{x^2 + d^2} / c$$

$$t'_2 = \sqrt{(x - L)^2 + d^2} / c + \tau$$

$$\tau = L / c$$

$$f_0(x, t) = \frac{ct - x}{d^2 + \beta^2(ct - x)^2}$$

$$f_1(x, t) = \frac{x + \beta^2(ct - x)}{\zeta(x, d, t)}$$

$$\zeta(x, d, t) = \sqrt{(\beta ct)^2 + \frac{(x^2 + y^2)}{\gamma^2}}$$

با وجود اینکه مدل‌های تزویج استفاده شده برای فرمول‌های راسک و هویدالن متفاوت هستند برای زمان‌های کوچک‌تر از t'_2 در $x = 0$ ، رابطه (۲-۴۵) مربوط به فرمول هویدالن با رابطه (۲-۲۳)

معرفی شده در فرمول راسک معادل می‌باشد. البته باید ذکر شود که Cooray در مطالعات خود معادل بودن مدل‌های تزویج راسک و موج آنتن را اثبات نموده است. تجزیه و تحلیل‌هایی صورت گرفته در عمق چهار فرمولی که در زیربخش‌های ۲-۴-۱ تا ۲-۴-۴ معرفی شده‌اند نشان می‌دهند که همه آنها از عبارات تقریبی برای میدان الکترومغناطیسی تزویج شونده با خط هوایی استفاده کرده‌اند که به نوبه خود باعث استفاده از تابع نیروی تقریبی برای معادلات تزویج می‌شود. علاوه بر این بعضی از آنها بر پایه معادلات تزویج ناقص بنا شده‌اند که به‌طور قطع به نتایجی با دقت پایین منجر خواهند شد. لذا در ادامه مطالعات صورت گرفته در این مبحث محققان سعی بر آن داشتند که عبارت تحلیلی دقیقی برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی به دست آورند. در مطالعات انجام شده توسط Andreotti [۱۷] عبارت دقیق و معتبری برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه و زمین بدون تلفات ارائه شده است. همچنین در مطالعات صورت گرفته توسط Andreotti [۱۸] رابطه معتبری برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در حضور زمین با رسانایی محدود (زمین با تلفات) معرفی گردیده است. در ادامه به معرفی این دو روش پرداخته می‌شود.

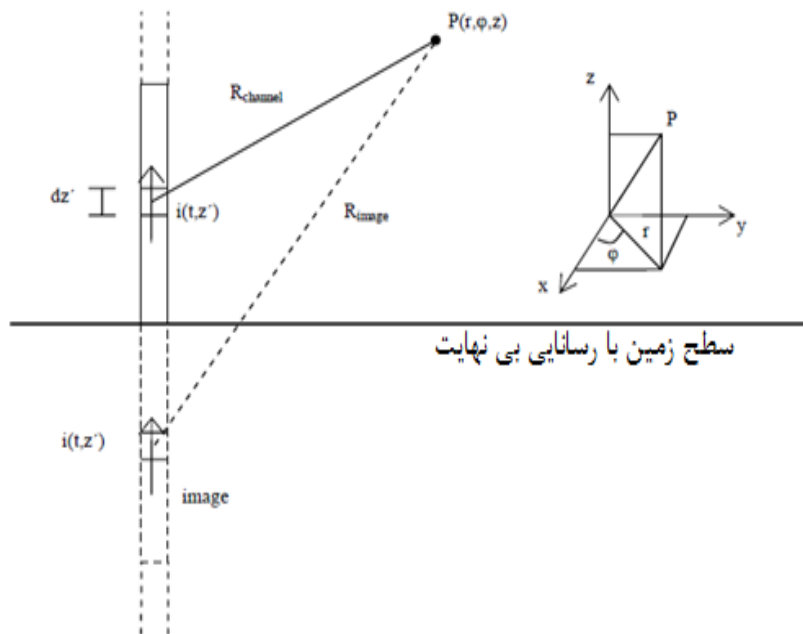
۲-۴-۵- روش دقیق محاسبه اضافه ولتاژ القایی برای زمین بدون تلفات

روابط و معادلاتی که در زیر بخش‌های ۲-۴-۱ تا ۲-۴-۴ برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی ارائه شده بودند، تقریبی می‌باشند. این روابط معرفی شده به این علت تقریبی می‌باشند که یا از عبارات تقریبی برای میدان الکترومغناطیسی تزویج شده با خط هوایی استفاده کرده‌اند که به نوبه خود باعث استفاده از تابع نیروی تقریبی برای معادلات تزویج می‌شود و یا علاوه بر این بعضی از آنها بر پایه معادلات تزویج ناقص بنا شده بودند. پس لازمه دقیق خواندن یک رابطه در این مبحث این می‌باشد که هم میدان الکترومغناطیسی مربوطه و هم معادلات تزویج به طور دقیق در نظر گرفته و محاسبه شوند.

۲-۴-۵-۱ - حل دقیق میدان الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه

به طور کلی برای محاسبه میدان الکترومغناطیسی ناشی از یک توزیع جریان الکتریکی و بار شناخته شده دو روش وجود دارد. روش اول تکنیک تک قطبی^۱ می باشد که اصولاً در مقالات سیستم قدرت برای محاسبات ناشی از تابش صاعقه استفاده می شود. روش دیگر تکنیک دو قطبی^۲ می باشد که به صورت گسترده در تئوری آنتن مورد استفاده قرار می گیرد، ولی امروزه به صورت گسترده برای ارزیابی تابش صاعقه و محاسبات اضافه ولتاژ القایی نیز استفاده می شود. در مقالات اثبات شده است که هر دو روش مطلقاً معادل هم می باشد [۱۹].

بین این دو روش معادل برای اهداف تحلیلی، نتایج تکنیک چند قطبی رفتار تحلیلی مناسب تری دارد و بنابراین در این مطالعه نیز همین روش به کار گرفته شده است. در شکل ۲-۸ ساختار مسئله برای محاسبه میدان با استفاده از تکنیک چند قطبی نشان داده شده است. در شکل ۲-۸، میدان الکترومغناطیسی برای هر دو شکل ۲-۷ الف و ۲-۷ ب ارائه می شود.



شکل (۲-۸) ساختار مسئله برای محاسبه میدان های الکترومغناطیسی

¹ Monopole

² Dipole

الف : کانال صاعقه بدون بار الکتریکی :

عبارات تحلیلی مربوط به میدان الکترومغناطیسی در سطح زمین برای مدل شکل ۲-۷-الف از مرجع [۲۰] استخراج شده است. تعمیم دادن این نتایج برای ارتفاع دلخواه Z کاری آسان می‌باشد.

$$e_r(r, z, t) = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta r} \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{\beta ct - z}{\zeta_{ch}} - \frac{\beta ct + z}{\zeta_{im}} + \frac{2z}{\sqrt{r^2 + z^2}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۴۶-۲)$$

$$e_z(r, z, t) = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta r} \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{1}{\gamma^2 \zeta_{ch}} + \frac{1}{\gamma^2 \zeta_{im}} - \frac{2z}{\sqrt{r^2 + z^2}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۴۷-۲)$$

$$h_\varphi(r, z, t) = \frac{I_0}{4\pi r} \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{\beta ct - z}{\zeta_{ch}} - \frac{\beta ct + z}{\zeta_{im}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۴۸-۲)$$

در روابط (۴۶-۲) تا (۴۸-۲) عبارت‌های ζ_{ch} و ζ_{im} به صورت ذیل تعریف می‌گردند.

$$\zeta_{ch} = \sqrt{(\beta ct - z)^2 + (r/\gamma)^2}$$

$$\zeta_{im} = \sqrt{(\beta ct + z)^2 + (r/\gamma)^2}$$

ب : کانال صاعقه با بار الکتریکی اولیه :

عبارت‌های تحلیلی برای قسمت‌های مورد نیاز میدان الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه مرتبط به مدل شکل ۲-۷-ب از مرجع [۲۱] استخراج شده است که معادلات مربوط به این دو قسمت به صورت روابط (۴۹-۲) و (۵۰-۲) می‌باشد.

$$e_r(r, z, t) = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta r} \begin{cases} -\frac{2z}{\sqrt{r^2 + z^2}} & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{\beta ct - z}{\zeta_{ch}} - \frac{\beta ct + z}{\zeta_{im}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۴۹-۲)$$

$$e_z(r, z, t) = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta r} \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{r^2 + z^2}} & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{1}{\gamma^2 \zeta_{ch}} + \frac{1}{\gamma^2 \zeta_{im}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۵۰-۲)$$

در حالتی که کانال صاعقه دارای بار الکتریکی باشد عبارت $h_{\varphi}(r, z, t)$ مطابق با رابطه (۲-۴۸) خواهد بود، چرا که توزیع استاتیکی بارهای الکتریکی هیچ میدان مغناطیسی‌ای تولید نمی‌نماید. با مقایسه (۲-۴۹) و (۲-۵۰) با (۲-۴۶) و (۲-۴۷) مشاهده می‌شود که این روابط به ترتیب در جمله‌های $\frac{2z}{\sqrt{r^2+z^2}}$ و $\frac{-2}{\sqrt{r^2+z^2}}$ با هم تفاوت دارند که این جمله‌ها ناشی از میدان تولید شده توسط توزیع استاتیکی بارها می‌باشد.

۲-۴-۵-۲- حل دقیق میدان ناشی از صاعقه برای تزویج با خط هوایی

در مطالعات صورت گرفته در [۱۷] مدل معرفی شده توسط تیلور که یک رهیافت کلی و مستقل از منبع می‌باشد برای مدل تزویج خط انتقال انتخاب شده است. در این مدل معادلات تزویج خط در حوزه زمان به صورت روابط (۲-۵۱) و (۲-۵۲) می‌باشد.

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} + c' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h b_y(x, d, z, t) dz \quad (۲-۵۱)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + c' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = -c' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h e_z(x, d, z, t) dz \quad (۲-۵۲)$$

معادلات (۲-۵۱) و (۲-۵۲) می‌توانند در عباراتی فقط متشکل از قسمت‌های میدان الکتریکی بازنویسی شوند:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} + c' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h e_z(x, d, z, t) dz + [e_x(x, d, h, t) + e_x(x, d, 0, t)] \quad (۲-۵۳)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + c' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = -c' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h e_z(x, d, z, t) dz \quad (۲-۵۴)$$

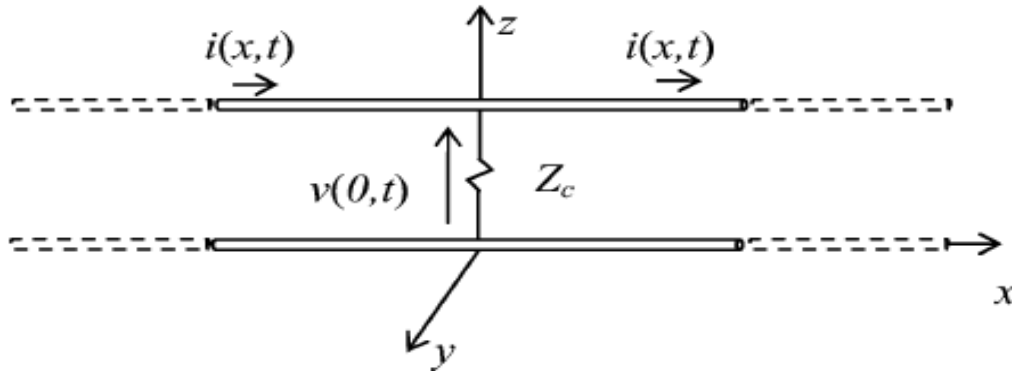
حل معادلات تزویج در $x = 0$ برای یک خط با طول L که در دو انتهایش به امپدانس مشخصه خود ختم شده است به صورت رابطه (۲-۵۵) می‌باشد.

$$v(0, t) - Z_c i(0, t) = v(L, t - \tau) - Z_c i(L, t - \tau) + \int_0^h e_z(L, d, z, t - \tau) dz - \int_0^h e_z(0, d, z, t) dz - \int_0^L e_L(x, d, t - x/c) dx \quad (۲-۵۵)$$

در رابطه (۵۵-۲) :

$$e_L(x, d, t) = e_x(x, d, h, t) - e_x(x, d, 0, t) \quad (۵۶-۲)$$

حل (۵۵-۲) را می‌توان برای یک خط با طول نیمه محدود دوتایی (مانند شکل ۹-۲) که دارای امپدانس مشخصه در وسط می‌باشد، تعمیم داد.



شکل (۹-۲) خط دوتایی با طول نیمه محدود [۱۷]

در این حالت ولتاژ القا شده $v(0, t)$ به صورت رابطه (۵۷-۲) خواهد بود.

$$v(0, t) = -\int_0^h e_z(0, d, z, t) dz - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e_L(x, d, t - |x|/c) \operatorname{sgn}(x) dx \quad (۵۷-۲)$$

دو خط دوتایی با طول نیمه محدود شبیه یک خط با طول نامحدود عمل می‌کند و این همان مطلوب مسئله می‌باشد. در نتیجه برای یک طول دلخواه x به جای موقعیت مرکزی $x = 0$ می‌توان نوشت:

$$v(x, t) = -\int_0^h e_z(x, d, z, t) dz - \frac{1}{2} \int_x^{+\infty} e_L(\zeta, d, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^x e_L(\zeta, d, t + \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta \quad (۵۸-۲)$$

۳-۵-۴-۲- راه‌حل دقیق محاسبه اضافه ولتاژ القایی

در این زیر بخش معادلات دقیقی برای محاسبه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خط هوایی برای هر دو مدل شکل ۷-۲ الف و ۷-۲ ب ارائه می‌شود. ابتدا باید در نظر داشت که برای حالت زمین با رسانایی کامل جمله $e_x(x, d, 0, t)$ در رابطه (۵۶-۲) برابر صفر می‌باشد، بنابراین در سمت چپ

فقط $e_x(x, d, h, t)$ وجود خواهد داشت. به منظور به کار بردن حل (۵۸-۲) محاسبه دو قسمت میدان $e_x(x, d, h, t)$ و $e_z(x, d, z, t)$ لازم می‌باشد. قسمت $e_z(x, d, z, t)$ به آسانی توسط (۲-۴۷)، برای شکل ۲-۷-الف و توسط (۲-۵۰)، برای شکل ۲-۷-ب به دست می‌آید. عبارت $e_x(x, d, h, t)$ از بررسی میدان شعاعی $e_r(x, d, h, t)$ طبق رابطه (۲-۴۶) برای شکل ۲-۷-الف و طبق رابطه (۲-۴۸) برای شکل ۲-۷-ب در طول محور خط، به دست می‌آید، که به صورت رابطه (۲-۵۹) می‌باشد.

$$e_x(x, d, h, t) = \frac{x}{r} e_r(x, d, h, t) \quad (۲-۵۹)$$

الف : کانال صاعقه بدون بار الکتریکی :

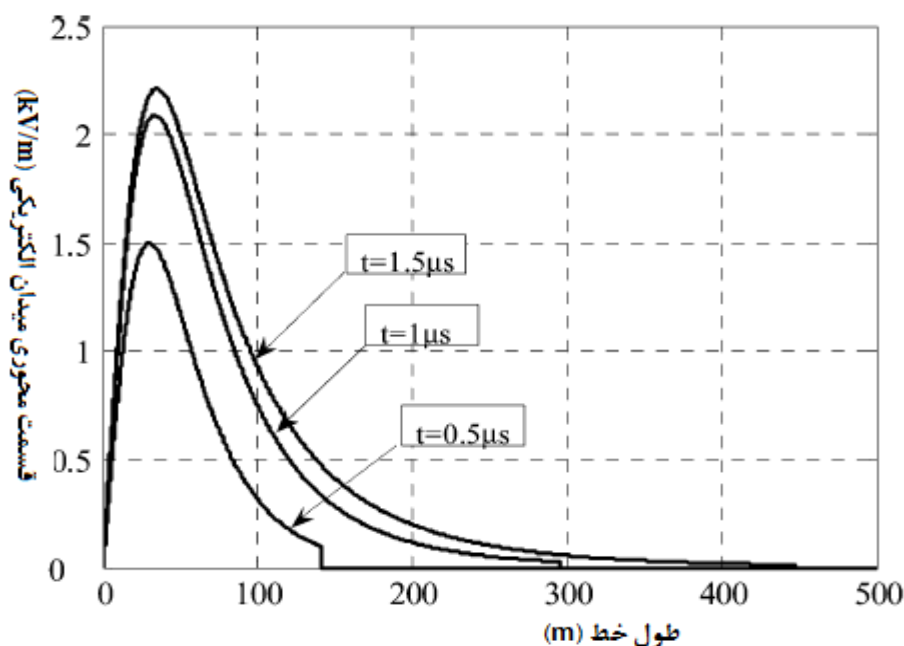
در این حالت هیچ ولتاژی قبل از رسیدن میدان ناشی از صاعقه به خط در آن ایجاد نخواهد شد، پس هنگامی که میدان الکترومغناطیسی انتشار یافته صاعقه به خط می‌رسد ولتاژ در خط هوایی القا می‌شود. از این رو محاسبات زیر به $t > t_1$ اشاره خواهد داشت. اکنون با شروع از (۲-۴۶) و در نظر گرفتن (۲-۴۸) می‌توان نوشت:

$$e_x = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \frac{x}{d^2 + x^2} \left(\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}} - \frac{2h}{\sqrt{x^2 + d^2 + h^2}} \right) \quad (۲-۶۰)$$

یک رسم از قسمت محوری تصویر موج میدان الکتریکی در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است که میدان در راستای خط برای مقادیر مختلف زمان رسم شده است. شایان ذکر است که پدیده شکستی که به وجود آمده به خاطر انتشار میدان الکترومغناطیسی ایجاد می‌گردد.

جز عمودی e_z توسط رابطه (۲-۴۷) داده شده است. اکنون که همه قسمت‌های میدان در دسترس می‌باشند سه انتگرال رابطه (۲-۵۸) می‌توانند محاسبه شوند. محاسبه انتگرال اول در رابطه (۲-۵۸) ساده بوده و حل آن به صورت رابطه (۲-۶۱) می‌باشد.

$$\int_0^h e_z(x, d, z, t) dz = -\frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \left[2 \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + d^2 + x^2}}{\sqrt{d^2 + x^2}} - \frac{1}{\gamma^2} \ln \frac{\beta ct + h + \sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}}{\beta ct - h + \sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} \right] \quad (۲-۶۱)$$



شکل (۱۰-۲) قسمت محوری میدان الکتریکی در طول خط برای مدل شکل ۲-۷-الف [۱۷]

حل دو انتگرال باقی مانده دیگر از رابطه (۲-۵۸) به صورت روابط (۲-۶۲) و (۲-۶۳) می باشد.

$$\int_x^{\infty} e_L \left(\zeta, d, t - \frac{\zeta - x}{c} \right) d\zeta = \int_x^{x_l} e_x \left(\zeta, d, h, t - \frac{\zeta - x}{c} \right) d\zeta \quad (۲-۶۲)$$

$$\int_{-\infty}^x e_L \left(\zeta, d, t + \frac{\zeta - x}{c} \right) d\zeta = \int_{x_l'}^x e_x \left(\zeta, d, h, t + \frac{\zeta - x}{c} \right) d\zeta \quad (۲-۶۳)$$

حد انتگرال x_l در رابطه (۲-۶۲) از حل معادله (۲-۶۴) به دست می آید.

$$t - \sqrt{\frac{d^2 + h^2 + x_l^2}{c}} - \frac{x_l - x}{c} = 0 \quad (۲-۶۴)$$

از این طریق تأخیر ناشی از انتشار میدان الکترومغناطیسی و تأخیر ناشی از اثرات انتشار در طول خط در محاسبات مربوطه به حساب آورده می شوند. حل معادله (۲-۶۴) به صورت رابطه (۲-۶۵) می باشد.

$$x_l = \frac{1}{2} \frac{(ct+x)^2 - h^2 - d^2}{ct+x} \quad (۶۵-۲)$$

همان فرایندی که برای حد انتگرال x_l به کار گرفته شده برای حد انتگرال x_l' در رابطه (۶۳-۲) نیز اعمال می شود ولی این بار یک انتخاب متفاوت از زمان تأخیر در طول خط در نظر گرفته شود. در نهایت:

$$x_l' = -\frac{1}{2} \frac{(ct-x)^2 - h^2 - d^2}{ct-x} \quad (۶۶-۲)$$

حل رابطه (۶۲-۲) به صورت رابطه (۶۷-۲) می باشد.

$$\int_x^\infty e_L \left(\zeta, d, t - \frac{\zeta - x}{c} \right) d\zeta = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \left\{ \begin{aligned} & \ln \frac{\lambda_p - \beta x_l + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_p)^2 + \delta_l^2}}{\lambda_m - \beta x_l + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_m)^2 + \delta_l^2}} + \ln \frac{\lambda_m - \beta x + \sqrt{(\beta x - \lambda_m)^2 + \delta^2}}{\lambda_p - \beta x + \sqrt{(\beta x - \lambda_p)^2 + \delta^2}} \\ & + \beta \left[-\ln \frac{x_l - \beta \lambda_m + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_m)^2 + \delta_l^2}}{x_l - \beta \lambda_p + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_p)^2 + \delta_l^2}} + \ln \frac{x - \beta \lambda_m + \sqrt{(\beta x - \lambda_m)^2 + \delta^2}}{x - \beta \lambda_p + \sqrt{(\beta x - \lambda_p)^2 + \delta^2}} \right] \\ & + \ln \frac{-h + \sqrt{d^2 + h^2 + x^2}}{h + \sqrt{d^2 + h^2 + x^2}} + \ln \frac{h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_l^2}}{-h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_l^2}} \end{aligned} \right\} \quad (۶۷-۲)$$

حل رابطه (۶۳-۲) با تغییر علامت x در رابطه (۶۷-۲) به دست می آید. سرانجام با ترکیب (۶۷-۲) (یک بار با x و یک بار با $-x$) و (۶۱-۲) در رابطه (۵۸-۲)، راه حل دقیقی برای محاسبه ولتاژ القایی در راستای طول یک خط دلخواه به دست می آید که به صورت رابطه (۶۸-۲) ارائه شده است.

$$v(x, t) = v_1(x, t) + v_1(-x, t) + v_2(x, t) + v_2(-x, t) \quad (۶۸-۲)$$

در رابطه (۶۸-۲):

$$v_1(x, t) = \frac{\zeta_0 I_0}{8\pi\beta} \left[\begin{aligned} & \ln \frac{\lambda_m - \beta x_l + \sqrt{(\lambda_m - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}}{\lambda_p - \beta x_l + \sqrt{(\lambda_p - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}} + \beta \ln \frac{x_l - \beta \lambda_m + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_m)^2 + \delta_l^2}}{x_l - \beta \lambda_p + \sqrt{(\beta x_l - \lambda_p)^2 + \delta_l^2}} \\ & - \beta \ln \frac{x - \beta \lambda_m + \sqrt{(\beta x - \lambda_m)^2 + \delta^2}}{x - \beta \lambda_p + \sqrt{(\beta x - \lambda_p)^2 + \delta^2}} \end{aligned} \right] \quad (۶۹-۲)$$

$$v_2(x,t) = \frac{\zeta_0 I_0}{8\pi\beta} \left[\ln \frac{h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_i^2}}{-h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_i^2}} + \beta^2 \ln \frac{\lambda' + \sqrt{\lambda'^2 + \delta^2}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \delta^2}} \right] \quad (70-2)$$

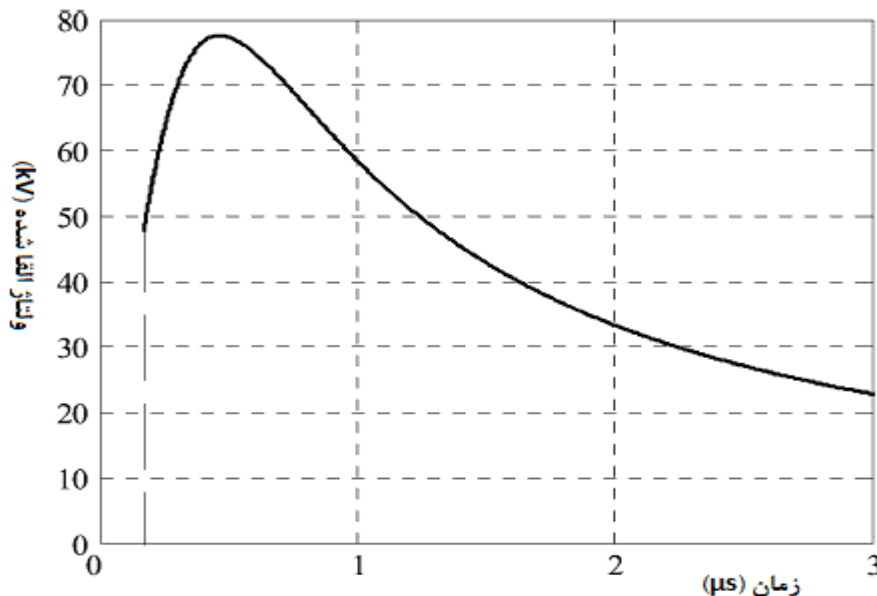
حل (۶۸-۲) می‌تواند برای $x = 0$ (نزدیک‌ترین نقطه به کانال صاعقه) مشخص شود. این مقدار خاص در استانداردهای اساسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت رابطه (۶۸-۲) در یک شکل خیلی ساده به صورت رابطه (۷۱-۲) بازنویسی می‌شود.

$$v(0,t) = 2[v_1(0,t) - v_2(0,t)] \quad (71-2)$$

در رابطه (۷۱-۲) عبارت $v_1(0,t)$ از رابطه (۷۲-۲) قابل محاسبه می‌باشد.

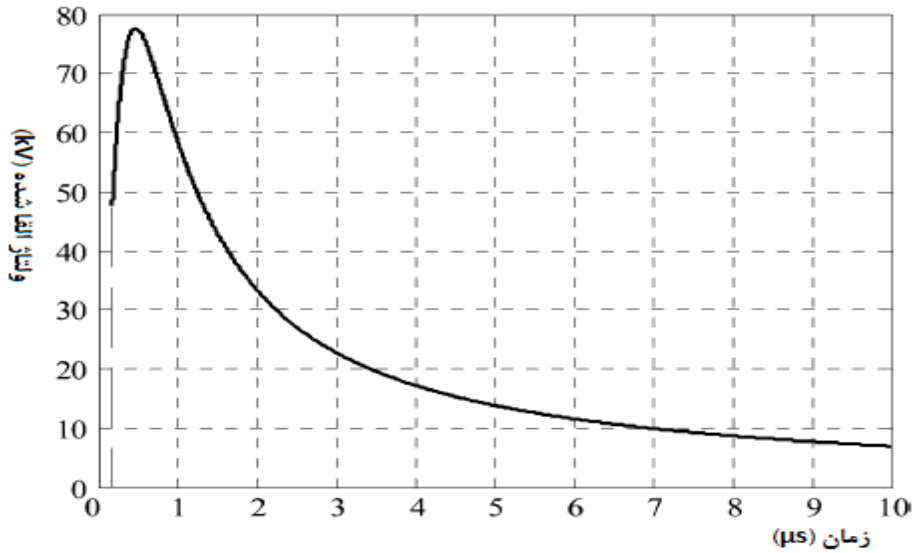
$$v_1(0,t) = -\frac{\zeta_0 I_0}{8\pi} \left[\beta \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \delta^2}) + \ln(-\beta\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \delta^2}) \right] \quad (72-2)$$

در رابطه (۷۱-۲) عبارت $v_2(0,t)$ از تغییر λ به λ' در رابطه (۷۲-۲) به دست می‌آید. شکل ۱۱-۲ تصویر موج ولتاژ القا شده در یک خط با ارتفاع ۱۰ m که در فاصله ۵۰ m از کانال صاعقه (با $I_0 = 10 \text{ kA}$ و $\beta = 0.4$) قرار دارد را نشان می‌دهد. مقیاس زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شده است تا ناپیوستگی‌ای که در شروع پدیده اتفاق می‌افتد را به وضوح به نمایش در بیاورد.

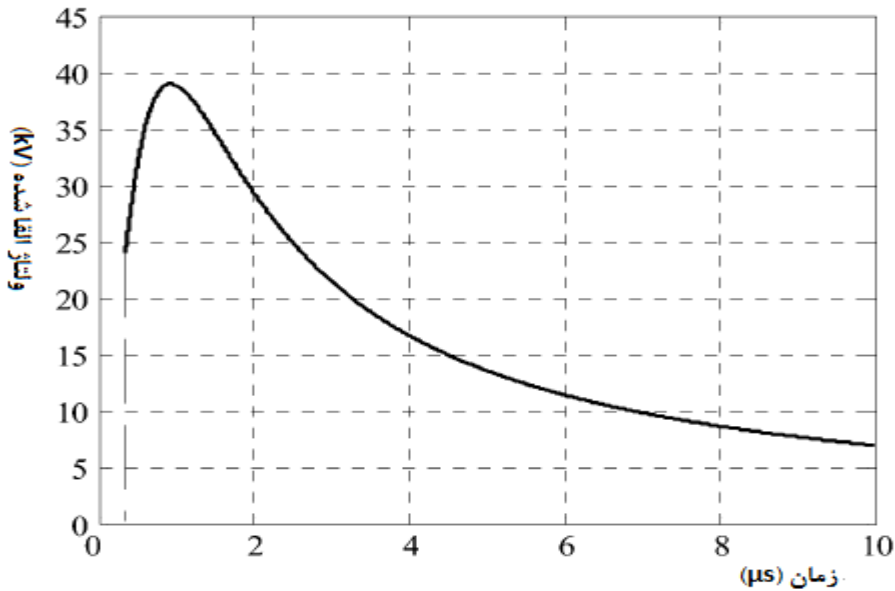


شکل (۱۱-۲) ولتاژ القا شده به دست آمده توسط راه‌حل دقیق مربوط به مدل شکل ۷-۲-الف [۱۷]

شکل ۲-۱۲ و ۲-۱۳ تصویر موج ولتاژ القا شده در بازه زمانی بزرگتری را در دو فاصله ۵۰ m و ۱۰۰ m نشان می‌دهند تا تمام شواهد پویای درگیر نشان داده شود.

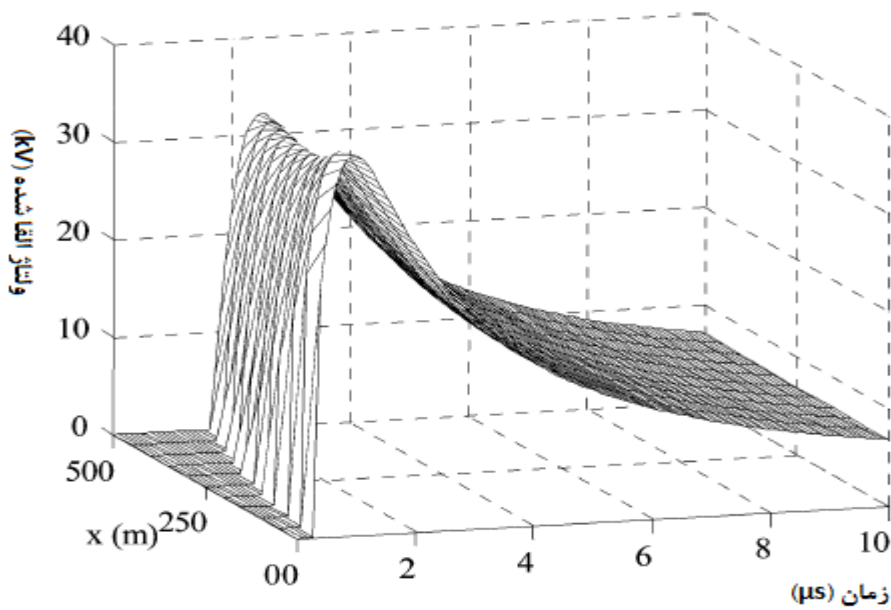


شکل ۲-۱۲) موج ولتاژ القا شده در خطی که ۵۰ m از کانال صاعقه فاصله دارد [۱۷]



شکل ۲-۱۳) موج ولتاژ القا شده در خطی که ۱۰۰ m از کانال صاعقه فاصله دارد [۱۷]

شکل ۲-۱۴ یک رسم سه بعدی از ولتاژ القا شده در طول خط را نشان می‌دهد که می‌توان دید چگونه انرژی صاعقه در لحظات اولیه پدیده گرفته شده و سپس منتشر می‌گردد.



شکل (۲-۱۴) ترسیم سه بعدی موج ولتاژ القا شده در خطی که ۱۰۰ m از کانال صاعقه فاصله دارد [۱۷]

ب : کانال صاعقه دارای بار الکتریکی اولیه :

در این زیر بخش راه حل دقیق محاسبه ولتاژ القایی در خط هوایی برای مدل شکل ۲-۷-ب ارائه می‌گردد. در این حالت باید حل رابطه (۲-۵۸) برای قسمت عمودی میدان الکتریکی e_z داده شده با رابطه (۲-۵۰) و قسمت محوری میدان الکتریکی e_x داده شده با معادلات تزویج (۲-۴۹) و (۲-۵۹) مشخص شود.

حال باید سه انتگرال مربوط به رابطه (۲-۵۸) مورد محاسبه قرار گیرند. محاسبه انتگرال اول رابطه (۲-۵۹) ساده است و به صورت رابطه (۲-۷۳) می‌باشد.

$$\int_0^h e_z(x, z, t) dz = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \frac{1}{\gamma^2} \ln \frac{\beta ct + h + \sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}}{\beta ct - h + \sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} \quad (۲-۷۳)$$

در این حالت دو انتگرال دیگر رابطه (۲-۵۸) نیز به صورت روابط (۲-۷۴) و (۲-۷۵) می‌باشند.

$$\int_x^\infty e_L(\zeta, d, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta = \int_x^{x_1} e_x^d(\zeta, d, h, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta + \int_{x_1}^\infty e_x^s(\zeta, d, h, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta \quad (۲-۷۴)$$

$$\int_x^\infty e_L(\zeta, d, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta = \int_x^{x_1} e_x^d(\zeta, d, h, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta + \int_{x_1}^\infty e_x^s(\zeta, d, h, t - \frac{\zeta - x}{c}) d\zeta \quad (۲-۷۵)$$

در روابط (۷۴-۲) و (۷۵-۲) :

$$e_x^d = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \frac{x}{d^2 + x^2} \left(\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}} \right) \quad (۷۶-۲)$$

$$e_x^s = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \frac{x}{d^2 + x^2} \frac{2h}{\sqrt{d^2 + x^2 + h^2}} \quad (۷۷-۲)$$

در این حالت نیز حدود انتگرال x_l و x_l' کاملاً مشابه با عبارات مشخص شده با روابط (۶۵-۲) و (۶۶-۲) می‌باشند. حل انتگرال (۷۴-۲) توسط رابطه (۷۸-۲) داده شده است. همچنین حل انتگرال (۷۵-۲) از تغییر علامت x در رابطه (۷۸-۲) به دست می‌آید.

$$\int_{-x_l}^x e_x \left(x, h, t - \frac{x - \zeta}{c} \right) d\zeta = \frac{\zeta_0 I_0}{4\pi\beta} \left\{ \begin{aligned} & \ln \frac{\lambda_p - \beta x_l + \sqrt{(\lambda_p - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}}{\lambda_m - \beta x_l + \sqrt{(\lambda_m - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}} + \ln \frac{\lambda_m + \beta x + \sqrt{(\lambda_m + \beta x)^2 + \delta^2}}{\lambda_p + \beta x + \sqrt{(\lambda_p + \beta x)^2 + \delta^2}} \\ & + \beta \left[\ln \frac{\beta \lambda_m - x_l + \sqrt{(\lambda_m - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}}{\beta \lambda_p - x_l + \sqrt{(\lambda_p - \beta x_l)^2 + \delta_l^2}} + \ln \frac{\beta \lambda_p + x + \sqrt{(\beta x + \lambda_p)^2 + \delta^2}}{\beta \lambda_m + x + \sqrt{(\beta x + \lambda_m)^2 + \delta^2}} \right] \\ & - \ln \frac{(ct + h)}{(ct - h)} \end{aligned} \right\} \quad (۷۸-۲)$$

سرانجام با محاسبه رابطه (۷۸-۲) یک بار با x و یک بار با تغییر علامت x ($-x$) و قراردادن رابطه (۷۳-۲) در رابطه (۵۸-۲) می‌توان برای مدل شکل ۲-۷-ب یک راه‌حل دقیق برای محاسبه ولتاژ القا شده در یک طول دلخواه در راستای خط به دست آورد. لازم به ذکر است که این روابط تحلیلی ارائه شده برای شرایطی می‌باشد که زمین زیر خط هوایی بدون تلفات (رسانای کامل) در نظر گرفته شده باشد.

این نتایج به دست آمده مهم می‌باشند چرا که به صورت تحلیلی، هم‌ارزی دو نوع مدل متفاوت پیشنهاد شده برای وقوع صاعقه (شکل ۲-۷-الف و ب) را اثبات می‌نمایند. تنها تفاوت در این حقیقت نهفته است که در حالتی که کانال صاعقه دارای بار الکتریکی باشد برای $0 \leq t \leq t_1$

(یعنی وقتی که میدان به خط نرسیده است) از نظر تئوری باید یک مقدار ثابت ولتاژ در نظر گرفته شود.

۲-۴-۶- روش محاسبه اضافه ولتاژ القایی برای زمین دارای تلفات

مسئله کیفیت توان امروزه یک مسئله اساسی در صنعت برق می‌باشد. ضربات صاعقه اثبات کرده به زمین و اشیاء مجاور خط هوایی به خصوص در سطوح ولتاژ متوسط یک عامل بسیار تأثیرگذار بر روی کیفیت توان می‌باشد. ارزیابی دقیق اضافه ولتاژ القایی صاعقه برای فهم و شناخت این مسائل امری ضروری می‌باشد. روش‌های تحلیلی هم در فاز طراحی و هم در فاز آنالیز حساسیت از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. این روش‌ها همچنین در برنامه‌های کامپیوتری برای تجزیه و تحلیل اثرات صاعقه مفید بوده و به کار گرفته شده‌اند.

همان‌طور که در زیر بخش ۲-۴-۵ معرفی شد در سال ۲۰۱۰ آقای Andreotti [۱۷] یک رابطه تحلیلی دقیقی را برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خط هوایی قرار گرفته در بالای زمین بدون تلفات (زمین با رسانایی الکتریکی بی‌نهایت) معرفی کرده است. ایشان در ادامه تحقیقات خود در سال ۲۰۱۳ [۱۸] رابطه‌ای را برای حالتی که زمین دارای رسانایی الکتریکی محدودی باشد (زمین با تلفات) ارائه نموده‌اند که در این بخش به معرفی آن پرداخته می‌شود.

در بخش قبلی رابطه (۲-۲۸) برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه معرفی گردید. در رابطه (۲-۵۷)، e_x و e_z به ترتیب قسمت عمودی و قسمت افقی میدان الکتریکی تولید شده به وسیله جریان صاعقه می‌باشند. در حالت زمین با تلفات هم مقدار e_z و هم مقدار e_x با مقدار رسانایی الکتریکی زمین تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

با استفاده از تقریب کوری-رابینسون [۱۸] مقدار میدان در راستای خط (e_x) می‌تواند به وسیله رابطه (۲-۷۹) مورد محاسبه قرار گیرد.

$$e_x(x, y, z, t) = e_{xi}(x, y, z, t) - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} h_{yi}(x, y, 0, t) + h_{yi}(x, y, 0, t) * K(t) \quad (۲-۷۹)$$

در رابطه (۲-۷۹) علامت * به عمل کانولوشن اشاره دارد و $K(t)$ نیز به صورت رابطه (۲-۸۰) بیان می‌گردد.

$$K(t) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \frac{\sigma}{2\varepsilon} \left[J_0\left(\frac{\sigma}{2\varepsilon}t\right) - J_1\left(\frac{\sigma}{2\varepsilon}t\right) \right] e^{-(\sigma/2\varepsilon)t} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \frac{d}{dt} \left[J_0\left(\frac{\sigma}{2\varepsilon}t\right) e^{-(\sigma/2\varepsilon)t} \right] \quad (۸۰-۲)$$

در نتیجه رابطه (۵۷-۲) به رابطه (۸۱-۲) تبدیل می‌گردد.

$$\begin{aligned} v(x,t) = & -\int_0^h e_{zi}(x,d,z,t) dz - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e_{xi}(\eta,d,h,t - |\eta-x|/c) \cdot \text{sign}(\eta-x) d\eta \\ & + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \int_{-\infty}^{+\infty} h_{yi}(\eta,d,0,t - |\eta-x|/c) \cdot \text{sign}(\eta-x) d\eta \\ & - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [h_{yi}(\eta,d,0,t - |\eta-x|/c) \cdot \text{sign}(\eta-x)] * K(t) d\eta \end{aligned} \quad (۸۱-۲)$$

در رابطه (۸۱-۲) دو جمله اول عبارت سمت راست معادله، ولتاژ القایی در حالت زمین بدون تلفات را ارائه می‌نمایند، در حالی که دو جمله باقی‌مانده ضرورت در نظر گرفتن تأثیر تلفات زمین در محاسبه ولتاژ القایی صاعقه را نشان می‌دهند. عمل کانولوشن دو تابع دلخواه $f(t)$ و $g(t)$ در حوزه زمان به صورت رابطه (۸۲-۲) تعریف می‌گردد.

$$f(t) * g(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot g(t-\tau) d\tau \quad (۸۲-۲)$$

بر این اساس، جمله آخر عبارت سمت راست معادله در رابطه (۸۱-۲) (قسمتی که دارای ضرب $-\frac{1}{2}$ می‌باشد) را می‌توان به صورت رابطه (۸۳-۲) بازنویسی نمود.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_0^t h_{yi}(\eta,d,0,\tau - |\eta-x|/c) \cdot \text{sign}(\eta-x) K(t-\tau) d\tau \right] d\eta \quad (۸۳-۲)$$

اگر مرتبه انتگرال در رابطه (۸۳-۲) معکوس شود آنگاه رابطه (۸۳-۲) به (۸۴-۲) تبدیل می‌شود.

$$\int_0^t \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h_{yi}(\eta,d,0,\tau - |\eta-x|/c) \text{sign}(\eta-x) d\eta \right] \cdot K(t-\tau) d\tau \quad (۸۴-۲)$$

حال اگر عبارت $w_h(x,t)$ به صورت رابطه (۸۵-۲) تعریف گردد:

$$w_h(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_{yi}(\eta,d,0,t - |\eta-x|/c) \text{sign}(\eta-x) d\eta \quad (۸۵-۲)$$

آنگاه اگر $v_i(x,t)$ ولتاژ القا شده در حالت ایده آل (زمین بدون تلفات) باشد (رابطه (۷۱-۲)) در نهایت برای ولتاژ القا شده در حالتی که زمین دارای تلفات باشد رابطه (۸۶-۲) به دست می‌آید.

$$v(x, t) = v_i(x, t) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} w_h(x, t) - \frac{1}{2} \int_0^t w_h(x, \tau) K(t - \tau) d\tau \quad (۸۶-۲)$$

۲-۵- جمع بندی

با توجه به مطالب بیان شده و بررسی نتایج مطالعات صورت گرفته در مقالات مختلف مشاهده می شود که مدل های جریان صاعقه معمولاً به دو دسته کلی تقسیم می شوند. دسته اول مدل های جریان صاعقه با تابع نمایی دابل که معمولاً در رهیافت های عددی مورد استفاده قرار می گیرند و دسته دوم مدل های جریان صاعقه خطی و پله ای که معمولاً در رهیافت های تحلیلی مورد استفاده قرار می گیرند.

در مقالات برای محاسبه میدان های الکترومغناطیسی ناشی از ضربه غیرمستقیم صاعقه نیز دو رهیافت حل در حوزه زمان و حوزه فرکانس پیشنهاد شده است. با مقایسه این دو رهیافت با توجه به پیچیدگی حل در حوزه فرکانس و همچنین نتایج مناسب حاصل از حل در حوزه زمان، رهیافت محاسبه مستقیم و تحلیلی در حوزه زمان به عنوان رهیافت مناسب پیشنهاد می شود. در مطالعات انجام شده بر روی روش های محاسبه اضافه ولتاژ القایی حاصل از رخداد صاعقه غیرمستقیم بر روی خطوط هوایی شبکه توزیع نیز دو روش عددی و تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته است. روش های عددی مورد استفاده برای محاسبه ولتاژ القایی معمولاً مبتنی بر الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان بوده و نیازمند زمان محاسبات بالا و همچنین نیازمند پردازشگر با حافظه زیاد می باشند. روش های تحلیلی دارای سادگی بیشتری نسبت به روش های عددی می باشند که در این فصل به طور کامل تشریح گردیده اند.

۳- فصل سوم :

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

با توجه به مطالب ارائه شده در فصل دوم قابل مشاهده می‌باشد که تاکنون روش‌های و روابط متعددی برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی معرفی و ارائه شده‌اند. بیشتر این روش‌ها و رهیافت‌های معرفی شده تحلیلی بوده و از مدل‌های مهندسی برای مدل کردن ضربه برگشتی صاعقه استفاده نموده‌اند. در راستای اهداف این پایان‌نامه که محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه با استفاده از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه می‌باشد در مطالعات مربوط به این پایان‌نامه از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه برای مدل کردن ضربه برگشتی صاعقه استفاده شده است، چرا که در بین تمامی مدل‌های مناسب ارائه شده برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی صاعقه، مدل الکترومغناطیسی نسبتاً جدید و دقیق‌تر می‌باشد [۲۲].

مطالب این فصل بر روی موارد زیر متمرکز می‌باشند.

۱. مدل الکترومغناطیسی برای ضربه برگشتی صاعقه
۲. الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان (FDTD)
۳. تأثیر شرایط محیطی بر روی اضافه ولتاژ القایی در خطوط هوایی
۴. تأثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین بر روی اضافه ولتاژ القایی در خطوط هوایی

۳-۲- مدل الکترومغناطیسی برای ضربه برگشتی صاعقه

مدل‌های ضربه برگشتی صاعقه برای مشخص کردن سرچشمه حوادث در مطالعات مربوط به تعامل رعد و برق با اشیا و سیستم‌های مختلف و مطالعات ژئوفیزیک مورد نیاز می‌باشد. راکف و یومن بر اساس معادلات حاکم، مدل‌های ضربه برگشتی صاعقه را به چهار دسته متفاوت تقسیم کرده‌اند؛ مدل دینامیک گازی، مدل الکترومغناطیسی، مدل مدار توزیع شده و مدل مهندسی [۲۳]. از بین این چهار مدل یاد شده، مدل‌های الکترومغناطیسی و مهندسی به وفور برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی صاعقه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

¹ Finite Difference Time Domain

اساس مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه معادلات ماکسول می‌باشد. در این مدل به منظور به دست آوردن توزیع جریان در طول کانال صاعقه معادلات ماکسول به صورت عددی حل می‌شوند و برای این منظور معمولاً روش‌های ممان (MoM)¹ و تفاضلی محدود در حوزه زمان (FDTD) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه برای دستیابی به سرعت دلخواه ضربه برگشتی صاعقه که معمولاً کم‌تر از سرعت نور در فضای آزاد می‌باشد، سیم هادی که نشان دهنده کانال صاعقه است توسط یک محیط عایق احاطه شده و یا توسط اندوکتانس سری توزیع شده اضافی بارگذاری می‌گردد. محیط عایق ایجاد شده فقط برای دستیابی به توزیع جریان صاعقه در طول کانال بوده و بارگذاری مقاومتی نیز برای کنترل تضعیف جریان با افزایش ارتفاع به کار گرفته می‌شود [۲۲]، برای این خاطر که جریان کانال صاعقه از زمین به سمت بالا حرکت می‌کند و با افزایش ارتفاع از سطح زمین به دلایل مختلفی (مقاومت الکتریکی هوا و ...) جریان صاعقه تضعیف می‌گردد.

برخلاف مدل مداری توزیع شده و مدل مهندسی ضربه برگشتی صاعقه، مدل الکترومغناطیسی حل تمام موج منسجم را هم برای توزیع جریان صاعقه و هم برای میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از آن فراهم می‌آورد. با توجه به مقالات بررسی شده مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه به چهار دسته تقسیم می‌گردد [۲۲].

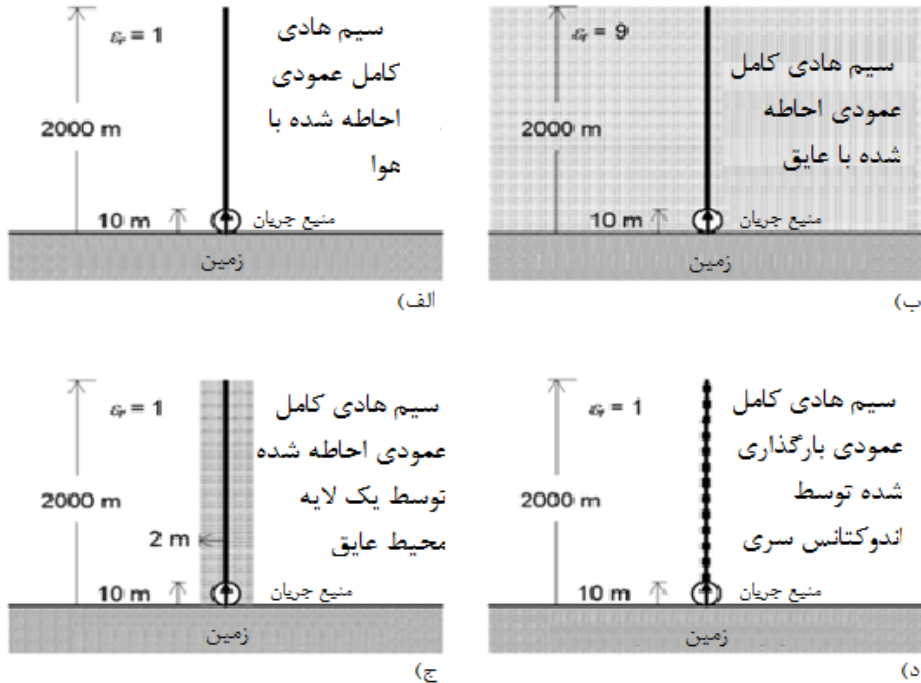
- ❖ نوع ۱: یک سیم مقاومتی/هادی کامل قرار گرفته در هوا
- ❖ نوع ۲: یک سیم هادی کامل احاطه شده توسط یک محیط عایق
- ❖ نوع ۳: یک سیم قرار گرفته در هوا که توسط اندوکتانس سری اضافی بارگذاری شده
- ❖ نوع ۴: یک سیم هادی کامل قرار گرفته در یک محیط تمام عایق

در هر چهار نوع مدل معرفی شده برای مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه باید انتهای نزدیک به زمین سیم هادی توسط یک منبع جریان تحریک شود که این منبع جریان نشان دهنده جریان کانال پایه صاعقه می‌باشد. در شکل ۱-۳ انواع مختلف مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه نشان داده شده است.

یکی از ویژگی‌های مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه این است که در بحث مربوط به بررسی اثرات صاعقه بر روی مدارهای الکتریکی نیازی به اتخاذ مدل اضافی برای تزویج میدان به هادی

¹Method of Moments

نمی‌باشد، البته باید این نکته را هم در نظر داشت که استفاده از مدل الکترومغناطیسی برای مدل کردن کانال صاعقه نسبت به سایر مدل‌ها محاسبات سنگینی را به دنبال خواهد داشت.



شکل (۱-۳) چهار نوع مدل الکترومغناطیسی معرفی شده برای کانال صاعقه [۲۲]

در مطالعات انجام شده در این پایان‌نامه از نوع دوم مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه (سیم هادی احاطه شده توسط یک محیط عایق) استفاده شده است که در ادامه این نوع از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه به صورت کامل تشریح می‌گردد. بدین منظور ابتدا موج TEM¹ بر پایه نظریه خط انتقال یکنواخت RLC باید مرور شود. سپس بر اساس این نظریه، مدل کردن کانال صاعقه به وسیله یک سیم هادی احاطه شده توسط یک محیط عایق مورد بحث قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که استفاده از نظریه خط انتقال RLC برای توصیف یک سیم هادی بالای زمین دارای تقریب می‌باشد به این دلیل که اندوکتانس L و کاپاسیتانس C که هر دو کمیت به صورت پریونیت می‌باشند با ارتفاع تغییر کرده و در نتیجه میدان‌هایی که به دست می‌آیند دارای ساختار TEM نخواهند بود.

برای خط انتقال یکنواخت RLC ثابت انتشار (γ_0) ، سرعت انتشار موج در طول خط (v_{p0}) و امپدانس مشخصه خط (Z_{c0}) به صورت روابط (۱-۳) تا (۳-۳) می‌باشند [۲۲].

¹ Transverse Electro-Magnetic

$$\gamma_0 = \sqrt{j\omega C_0(R_0 + j\omega L_0)} \quad (1-3)$$

$$v_{p0} = \frac{\omega}{\text{Im}(\gamma_0)} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \left[\frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{\omega L_0}\right)^2 + 1}} \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

$$Z_{c0} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}} \quad (3-3)$$

در روابط (۱-۳) تا (۳-۳) عبارت $\text{Im}(\gamma_0)$ نشان دهنده قسمت موهومی γ_0 ، ω فرکانس زاویه‌ای $(2\pi f)$ ، R_0 امپدانس سری خط به صورت پریونیت، L_0 اندوکتانس سری خط به صورت پریونیت و C_0 ظرفیت خازنی موازی خط به صورت پریونیت می‌باشد. اگر در فرکانس مورد نظر مقدار ωL_0 خیلی بزرگ‌تر از مقدار R_0 باشد روابط (۲-۳) و (۳-۳) را می‌توان به صورت روابط (۴-۳) و (۵-۳) بازنویسی نمود.

$$v_{p0} \cong \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4-3)$$

$$Z_{c0} \cong \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (5-3)$$

اگر خط انتقال توسط هوا احاطه شده باشد v_{p0} مربوط به رابطه (۴-۳) برابر سرعت نور در فضای آزاد (c) خواهد بود. وقتی که یک سیم عمودی توسط یک محیط عایق با ثابت دی‌الکتریک ϵ_r احاطه می‌شود سرعت فاز و امپدانس مشخصه آن به صورت روابط (۶-۳) و (۷-۳) تغییر می‌کند.

$$v_{pd} \cong \frac{1}{\sqrt{L_0 \epsilon_r C_0}} = \frac{v_{p0}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6-3)$$

$$Z_{cd} \cong \sqrt{\frac{L_0}{\epsilon_r C_0}} = \frac{Z_{c0}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{v_{pd}}{c} Z_{c0} \quad (7-3)$$

یکی دیگر از ویژگی‌های مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه، قابل تنظیم بودن سرعت ضربه برگشتی صاعقه (سرعت انتشار جریان صاعقه درون کانال صاعقه) است که طبق رابطه (۶-۳) با انتخاب مقدار ثابت دی‌الکتریک (ϵ_r) این عمل به سهولت قابل انجام می‌باشد. در تمام مطالعات

صورت گرفته در ارتباط با صاعقه این طور بیان گردیده است که سرعت ضربه برگشتی صاعقه مقداری بین یک سوم تا دو سوم سرعت نور در فضای آزاد می‌باشد.

۳-۳- الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان (FDTD)

قبل از پیدایش رایانه مسائل مرتبط با معادلات ماکسول اکثراً به صورت تحلیلی حل می‌شدند. از دهه ۱۹۶۰ به بعد با وجود آمدن امکان استفاده از رایانه برای حل مسائل الکترومغناطیس روش‌های حل عددی ابداع شدند. از جمله اولین روش‌ها در این زمینه روش‌های ممان (MOM)، المان محدود (FE) و روش‌های فرکانس بالا را می‌توان نام برد. البته این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. به طور مثال روش‌های فرکانس بالا قادر به مدل‌سازی مسائلی با اندازه الکتریکی بزرگی می‌باشند اما در مدل کردن ترکیبات مختلفی که از غیر هادی‌ها تشکیل شده‌اند دارای مشکل هستند. روش ممان نیز که بر اساس حل دستگاه‌های معادلات خطی عمل می‌کند در مدل‌سازی مسائلی که اندازه الکتریکی بزرگی دارند و همچنین در مدل کردن دقیق شکل‌های هندسی مشکلاتی دارد. روش المان محدود نیز مانند روش ممان بر اساس حل دستگاه‌های معادلات خطی عمل می‌کند با این تفاوت که ماتریسی که ضرایب را تشکیل می‌دهد به جای چگال بودن از نوع ماتریس اسپارس^۱ است و از این نظر مشکلات کم‌تری دارد [۲۴].

با پیدایش این روش‌ها، الگوریتم‌های سریعی برای حل مسائل الکترومغناطیس خطی به وجود آمدند. اما این سه روش مشکل بزرگ‌تری هم دارند. از آنجا که این روش‌ها مسائل را در حوزه فرکانس حل می‌کنند توانایی حل مسائل غیرخطی را ندارند. همچنین از آنجایی که اکثر مسائل عملی غیرخطی می‌باشند پس این روش‌ها کاربرد عملی چندانی نخواهند داشت. به طور مثال در مباحثی مانند میکروویو، مدارهای دیجیتال سرعت بالا، لیزر، تقویت کننده‌های موج میلیمتری و تراشه‌های الکترونیکی سرعت بالا این روش‌ها دارای کاربرد خاصی نمی‌باشند.

مشکلات ذکر شده موجب گردید تا دانشمندان به فکر راه کارهای دیگری بیفتند، تا در سال ۱۹۶۶ فردی به نام Yee الگوریتمی جدید ارائه نمود که به نام همین فرد شناخته می‌شود. این روش همچنین به روش FDTD نیز معروف می‌باشد که معرف الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان

¹ Sparse Matrix

می‌باشد. از سال ۱۹۹۰ به بعد به دنبال آشنایی مهندسی با مزایای این روش، FDTD به سرعت رواج پیدا کرد [۲۴].

از جمله دلایلی که مهندسی به روش FDTD رو آوردند می‌توان موارد زیر را نام برد:

- ➔ در راه‌حل‌های خود از جبر خطی و دستگاه معادلات خطی استفاده نمی‌کند و همین موضوع باعث می‌شود که این روش محدودیتی در اندازه‌گیری مسائلی ایجاد نکند. به عنوان مقایسه با روش‌های دیگر می‌توان بیان نمود که روش‌های المان محدود و ممان به طور معمول مسائلی را حل می‌نمایند که کمتر از M مجهول از مؤلفه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی را دارند. اما در مورد FDTD مسائلی با M مجهول هم تا کنون حل شده‌اند و از این نظر محدودیتی برای این عدد وجود ندارد.
- ➔ از آنجایی که منابع خطا در FDTD به خوبی شناخته شده‌اند و می‌توان آن‌ها را کنترل و محدود نمود در نتیجه جواب‌های FDTD دقیق و قابل اطمینان می‌باشد.
- ➔ با توجه به این که FDTD مسائل را در حوزه‌ی زمان حل می‌کند جواب‌های حاصل از این روش در سیستم‌های خطی به مثابه پاسخ ضربه می‌باشند که با داشتن آن می‌توان پاسخ سیستم به هر ورودی دلخواه را در یک محدوده وسیع فرکانسی به دست آورد. این نتایج فقط با یک بار اجرای برنامه و انتخاب درست ورودی به دست می‌آیند.
- ➔ چون راه‌حل FDTD در حوزه‌ی زمان می‌باشد امکان شبیه‌سازی و بررسی رفتارهای غیرخطی عناصر و ادوات مختلف در آن به راحتی وجود دارد.
- ➔ FDTD یک روش ساختاریافته می‌باشد به این معنی که برای مدل کردن یک ساختار جدید در اکثر مواقع نیازی به ایجاد تغییرات زیادی در فرمول نویسی‌های قبلی نیست و به راحتی با تغییر تعدادی از ماتریس‌های ضرایب مسئله‌ی جدید حل می‌شود.
- ➔ در حل مسائلی که نیاز به حجم محاسباتی بالایی دارند می‌توان با موازی کردن چند پردازشگر با هم مسئله را با سرعت قابل قبولی حل نمود برای این کار به یک یا چند حافظه مرکزی برای ذخیره کردن میدان‌ها و همچنین به چند پردازشگر با قابلیت دسترسی به همه حافظه‌ها نیاز دارد. این پردازشگرها می‌توانند کاملاً مستقل از هم کار کنند، فقط باید هم زمانی بین محاسبات آن‌ها به طور مناسبی صورت گیرد.

➔ خود این که در FDTD میدان‌ها در حوزه‌ی زمان محاسبه می‌شوند باعث می‌شود که به راحتی بتوان نمایش‌های گرافیکی زیبایی از نتایج میدان‌ها و چگونگی انتشار و یا تداخل آنها با ساختارهای موجود در محیط مسئله به دست آورد.

موفقیت روش FDTD به عنوان اولین روش حل مسائل در حوزه زمان به قدری چشمگیر و قابل توجه بوده است که دانشمندان طی چند سال پس از مطرح شدن آن روش المان محدود در حوزه زمان و همچنین روش حجم محدود در حوزه زمان را پایه‌گذاری کرده‌اند. پیشرفت‌هایی که پس از آن صورت گرفته منجر به مطرح شدن روشی شده که نیازی به روش پایدار نداشته و همیشه پایدار می‌باشد. از جمله نرم‌افزارهایی که در حل مسائل از الگوریتم FDTD بهره می‌گیرند می‌توان نرم‌افزار FEKO، CST و HFSS را نام برد.

روش FDTD اولیه توسط Yee معرفی شده و در ادامه توسط Tavlove تکمیل گردیده است. این روش یک راه‌حل مستقیم برای معادلات دیفرانسیل فارادی و آمپر می‌باشد [۲۵].

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (۸-۳)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (۹-۳)$$

با فرض اینکه در فضای حل معادلات، ε و μ همگن، مستقل از فرکانس و دارای یک مقدار ثابت باشند روابط (۸-۳) و (۹-۳) را می‌توان به شش معادله دیفرانسیل جزئی به صورت روابط (۱۰-۳) تا (۱۵-۳) تقسیم نمود.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad (۱۰-۳)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (۱۱-۳)$$

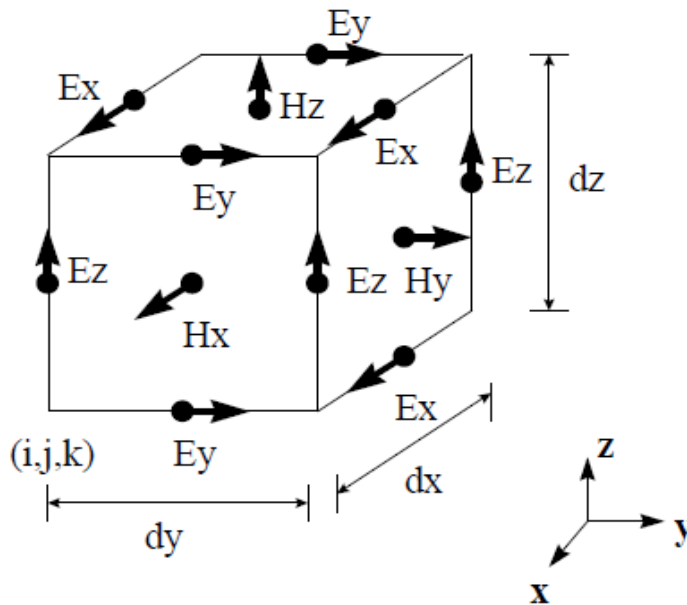
$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad (۱۲-۳)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (۱۳-۳)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (14-3)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (15-3)$$

در الگوریتم FDTD مدل فضای حل مسئله به شبکه‌ای از واحدهای سلولی گسسته تقسیم می‌شود که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. یک نقطه فضایی در سلول شبکه به صورت $(x, y, z) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ تعریف می‌شود و هر تابعی از فضا و زمان نیز به صورت $F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)$ تعریف می‌گردد که در آن Δx ، Δy و Δz المان‌های فضایی شبکه در جهت بردارهای x ، y و z ، Δt پله افزایشی زمان و i ، j ، k و n اعداد صحیح می‌باشند.



شکل (۲-۳) نحوه توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در سلول شبکه FDTD [۲۵]

با اعمال تقریب اختلاف مرکزی که به صورت رابطه (۱۶-۳) و (۱۷-۳) می‌باشد معادلات دیفرانسیل (۱۰-۳) تا (۱۵-۳) به معادلات دیگری تبدیل می‌شوند.

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta x} \quad (16-3)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (17-3)$$

در شبکه‌های فضایی مساوی مقدار خطا برای معادلات (۱۶-۳) و (۱۷-۳) به ترتیب برابر $(\Delta X)^2$ و $(\Delta t)^2$ می‌باشد. در نتیجه این معادلات اختلافی مرتبه اول دارای دقتی با مرتبه دوم می‌باشند. مطابق با شکل ۳-۲ از آنجا که اجزای میدان بر روی هر واحد سلول جای گرفته‌اند، اجزای میدان -های E و H به اندازه نصف یک سلول نسبت به هم فاصله دارند که این حالت با عنوان طرح "جهش قورباغه" شناخته می‌شود. این معادلات علاوه بر اینکه در فضا دارای طرح جهش قورباغه هستند در حوزه زمان نیز دارای طرح جهش قورباغه می‌باشند. در این الگوریتم فرض می‌شود که میدان E در زمان $n\Delta t$ و میدان H در زمان $(n + \frac{1}{2})\Delta t$ مدنظر باشد [۲۶].

با اعمال تقریب‌های اختلاف مرکزی (۱۶-۳) و (۱۷-۳) به روابط (۱۰-۳) تا (۱۵-۳) معادلات متفاوتی به صورت روابط (۱۸-۳) تا (۲۴-۳) به دست می‌آید.

$$\mu \frac{H_{xi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{xi,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta T} = \frac{E_{yi,j,k}^n - E_{yi,j,k-1}^n}{\Delta z} - \frac{E_{zi,j,k}^n - E_{zi,j-1,k}^n}{\Delta y} \quad (18-3)$$

$$H_{xi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = H_{xi,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_{yi,j,k}^n - E_{yi,j,k-1}^n] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_{zi,j,k}^n - E_{zi-1,j,k}^n] \quad (19-3)$$

$$H_{yi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = H_{yi,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_{zi,j,k}^n - E_{zi,j,k-1}^n] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_{xi,j,k}^n - E_{xi-1,j,k}^n] \quad (20-3)$$

$$H_{zi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = H_{zi,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_{xi,j,k}^n - E_{xi,j,k-1}^n] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_{yi,j,k}^n - E_{yi-1,j,k}^n] \quad (21-3)$$

$$E_{xi,j,k}^{n+1} = E_{xi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y} [H_{zi,j+1,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{zi,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta z} [H_{yi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{yi-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] \quad (22-3)$$

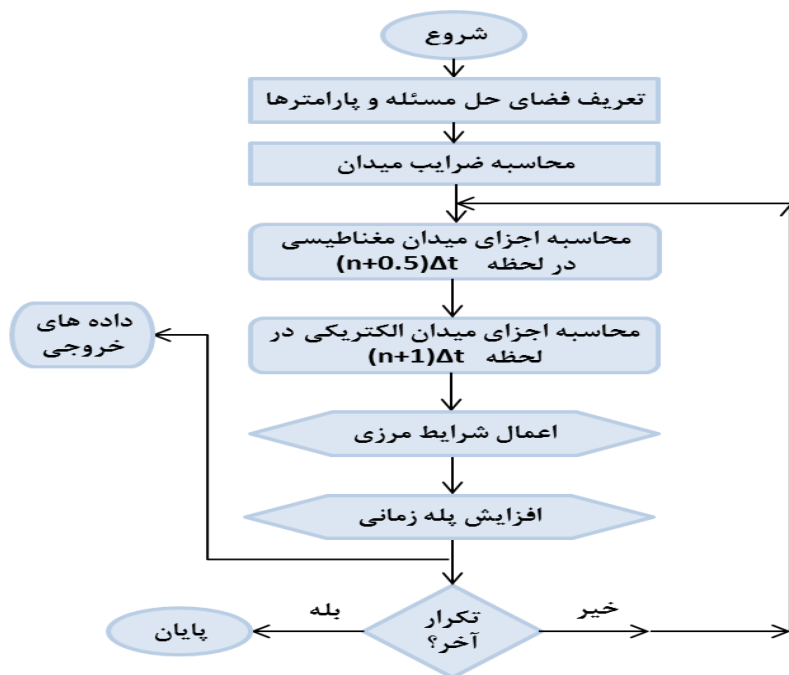
$$E_{yi,j,k}^{n+1} = E_{yi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta z} [H_{xi,j,k+1}^{n+\frac{1}{2}} - H_{xi,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_{zi,j,k+1}^{n+\frac{1}{2}} - H_{zi,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] \quad (23-3)$$

$$E_{zi,j,k}^{n+1} = E_{zi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_{yi+1,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{yi,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y} [H_{xi,j+1,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{xi,j,k}^{n+\frac{1}{2}}] \quad (24-3)$$

در این الگوریتم Δx ، Δy ، Δz و Δt به ترتیب بر اساس دقت و پایداری مورد نیاز مسئله انتخاب می‌شوند. برای اطمینان از دقت میدان‌های الکترومغناطیسی محاسبه شده، Δx ، Δy ، Δz باید در مقایسه با طول موج مسئله مورد نظر کوچک باشند. برای اطمینان از پایداری الگوریتم FDTD مقدار Δt باید کوچک‌تر از المان‌های فضایی شبکه (Δx ، Δy و Δz) انتخاب گردد. در شبکه‌های مکعبی برای Δt معمولاً مقدار اتخاذ می‌شود که در رابطه (۳-۲۵) صدق کند [۲۶].

$$\Delta t \leq \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (۳-۲۵)$$

فلوچارت الگوریتم جهش قورباغه برای روش FDTD و چگونگی بدست آوردن اجزای میدان الکترومغناطیسی در شکل ۳-۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳-۳) فلوچارت الگوریتم جهش قورباغه برای روش FDTD

آشنایی با نرم‌افزار CST^۱:

نرم‌افزار CST عمدتاً برای تحلیل و طراحی مسائل الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار بر اساس مدل کرنل^۲ ساختارهای گرافیکی را رسم می‌نماید سپس به صورت خودکار مش بندی نموده و شروع به شبیه‌سازی مسئله می‌نماید. یکی مزایای نرم‌افزار CST این می‌باشد

^۱ Computer Simulation Technology

^۲ Cornell

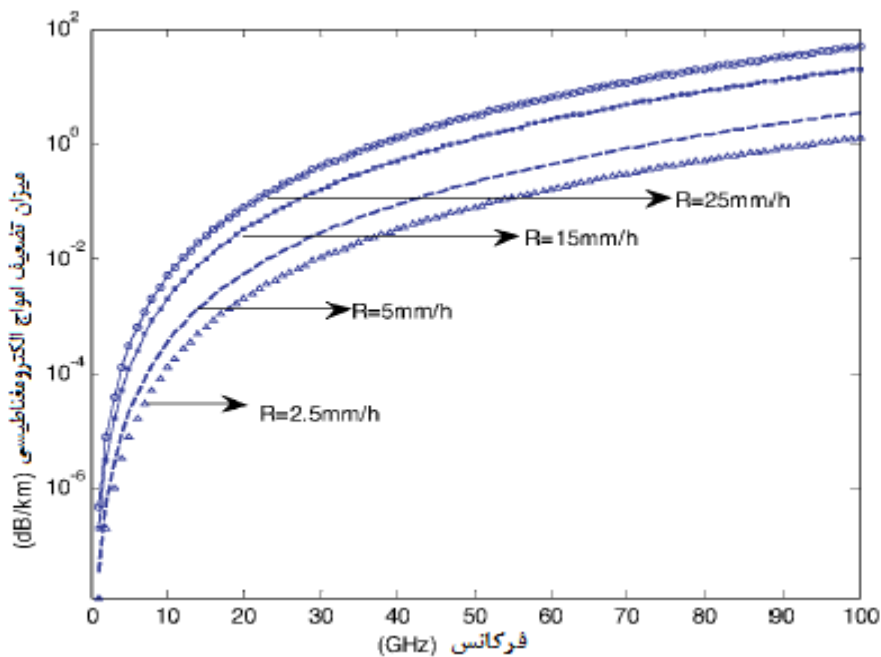
که بر اساس روش مورد نیاز کاربر، به کاربر اجازه دست کاری در مش بندی و روش شبیه سازی را می دهد. از آنجایی که هیچ روشی به تنهایی قادر به حل تمام مسائل در زمینه های مختلف نیست نرم افزار CST نیز برای حل مسائل گوناگون شامل تکنیک های شبیه سازی مختلفی می باشد.

- حل در حالت گذرا
- حل در حوزه فرکانس
- حل به روش معادله انتگرالی
- حل مسائل چند لایه
- حل به روش مجانبی
- حل به روش حالت ویژه

در نرم افزار CST عمل مش بندی مسئله مورد نظر با ساختارهای مختلفی قابل تعریف می باشد. نرم افزار CST در هر روش به طور خودکار بهترین نوع مش بندی را انتخاب می نماید. انعطاف پذیرترین روش حل، روش حالت گذرا می باشد که از مش بندی هشت وجهی استفاده می نماید و تمام بازه فرکانسی را شامل می شود. این روش برای مسائل خطوط انتقال، آنتن و فیلتر بسیار مناسب می باشد. روش حالت گذرا برای مسائلی که بعد الکتریکی کوچکی دارند (مسائلی که بعد فیزیکی آنها نسبت به کوچک ترین طول موج کوچک تر می باشد) مناسب نمی باشند و برای این مسائل بهتر است از روش حل در حوزه فرکانس استفاده شود. روش حل در حوزه فرکانس برای مسائلی که باند باریک یا بعد فیزیکی کوچکی دارند، مناسب می باشد. در این روش حل، از مش بندی ده وجهی استفاده می شود. این روش برای محاسبه پارامترهای پراکندگی و مسائل رزونانسی نیز مناسب می باشد. برای مسائلی که دارای بعد الکتریکی بزرگی هستند از روش معادله انتگرالی استفاده می شود که از مش بندی سطحی مثلثی استفاده می نماید. برای مسائلی که بعد الکتریکی آنها بسیار بزرگ است از روش مجانبی استفاده می شود. برای مسائلی که ساختار چند لایه و مسطح دارند از روش چند لایه استفاده می شود و برای مسائل مرتبط با بحث فیلتر که به محاسبه مدهای عملکردی نیاز می باشد از روش مود ویژه استفاده می شود.

۳-۴- تاثیر شرایط محیطی بر روی انتشار امواج الکترومغناطیسی در هوا

مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی کاملاً وابسته به شدت میدان‌های الکترومغناطیسی منتشر شده در هوا می‌باشد که این میدان‌ها از جریان صاعقه نشأت می‌گیرند [۲۷]. مطالعات نظری صورت گرفته به خوبی نشان می‌دهند که انرژی امواج منتشر شده در هوا رابطه بسیار تنگاتنگی با مقدار گذردهی الکتریکی نسبی هوا (ϵ_r) دارد [۲۸] به طوری که با تغییر مقدار ϵ_r ، انرژی امواج منتشر شده در فضای بالای زمین نیز دچار تغییر می‌شود. بر اساس استانداردهای معرفی شده مقدار ϵ_r هوای خشک برابر $1/0.006$ می‌باشد [۲۸]. در مطالعات صورت گرفته [۲۷ و ۲۸] نشان داده شده است که میزان تضعیف انرژی امواج انتشار یافته در هوای آزاد در شرایط آب و هوایی مختلف دارای تفاوت‌هایی می‌باشد چرا که ϵ_r و ضریب دی‌الکتریک هوا تابعی از پارامترهای مختلف مانند فشار هوا، رطوبت نسبی هوا، دمای هوا، فرکانس، نرخ بارش باران و ... می‌باشد به گونه‌ای که با تغییر این پارامترها مقدار ϵ_r نیز تغییر می‌کند. همچنین شرایط محیطی به ویژه رطوبت نسبی هوا نیز بر مقدار رسانایی هوا تأثیر می‌گذارد. در شکل ۳-۴ میزان تضعیف امواج الکترومغناطیسی منتشر شده در هوا به صورت تابعی از نرخ بارندگی در فرکانس‌های متفاوت نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) میزان تضعیف امواج الکترومغناطیسی در هوا به ازای نرخ بارندگی‌های متفاوت [۳۰]

با توجه به مطالعات اضافه ولتاژ القایی صورت گرفته می‌توان بیان نمود تنها پارامتری که در روابط مربوط به اضافه ولتاژ القایی (به عنوان مثال رابطه (۲-۸۱)) از شرایط محیطی تأثیر می‌پذیرد، ϵ_r هوا می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی برای به دست آوردن مقدار ϵ_r هوا در شرایط محیطی مختلف صورت گرفته و روابط متعددی برای محاسبه مقدار دقیق ϵ_r هوا در شرایط محیطی مختلف ارائه شده است. بیشتر این مطالعات توجه خود را بر روی فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی متمرکز نموده‌اند [۲۹،۳۰]. در ارتباط با بحث اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی که دارای فرکانسی در محدوده چند ده کیلوهرتز تا چند صد مگاهرتز می‌باشد می‌توان از رابطه (۳-۲۶) برای به دست آوردن مقدار دقیق ϵ_r در شرایط محیطی مختلف بهره گرفت [۳۱].

$$\epsilon_r = 1.006 + \left[1 + \frac{211}{T} \cdot \left(P + \frac{48 \cdot P_s}{T} \cdot RH \right) \cdot 10^{-6} \right] \quad (۳-۲۶)$$

RH = مقدار رطوبت نسبی هوا (%)

T = دمای مطلق هوا ($^{\circ}K$)

P = فشار هوا (mmHg)

P_s = فشار بخار آب اشباع در دمای T (mmHg)

۳-۴-۱- رطوبت نسبی هوا

رطوبت نسبی هوا^۱ واژه‌ای است که به منظور بیان وضعیت رطوبت هوا استفاده می‌شود و در حقیقت بیان می‌کند که در یک دمای مشخص، هوا به چه میزان به حالت اشباع نزدیک است. در بسته هوایی با دما و فشار معین، رطوبت نسبی بیان کننده نسبت بخار آب موجود در آن به مقدار آب مورد نیاز جهت اشباع آن بسته هوا می‌باشد. به بیان دیگر رطوبت نسبی هوا، نشان دهنده نسبت بخار آب موجود در یک بسته هوا به ظرفیت پذیرش بخار آب توسط آن بسته هوا می‌باشد. با توجه به آن که فشار بخار واقعی هوا بیانگر مقدار حقیقی بخار و فشار بخار اشباع نشانگر بیشینه ظرفیت پذیرش بخار آب در هوا می‌باشد رطوبت نسبی هوا در یک دمای معین را می‌توان نسبت

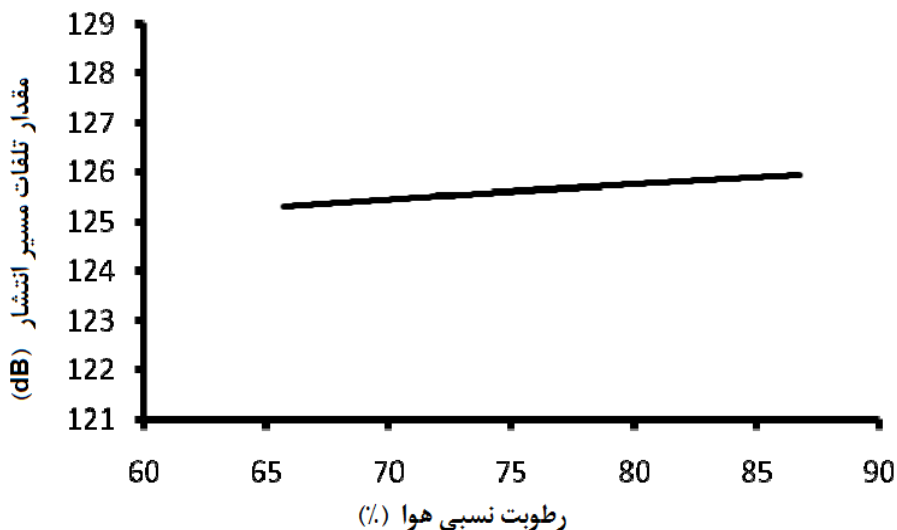
¹ Relative Humidity

فشار بخار واقعی هوا به فشار بخار اشباع هوا در آن دما دانسته و به صورت رابطه (۳-۲۷) تعریف می‌گردد [۳۲].

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \times 100 \quad (۳-۲۷)$$

در رابطه (۳-۲۷) RH ، e_a و e_s به ترتیب بیانگر مقدار رطوبت نسبی، فشار واقعی بخار آب و فشار بخار اشباع می‌باشند.

با توجه به رابطه (۳-۲۶) رطوبت نسبی هوا یکی از عواملی است که بر مقدار ϵ_r هوا و به دنبال آن بر میزان تضعیف انرژی امواج الکترومغناطیسی منتشر شده در هوا اثر گذار می‌باشد. در شکل ۳-۵ نحوه تغییرات تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از رطوبت نسبی هوا قابل مشاهده می‌باشد.

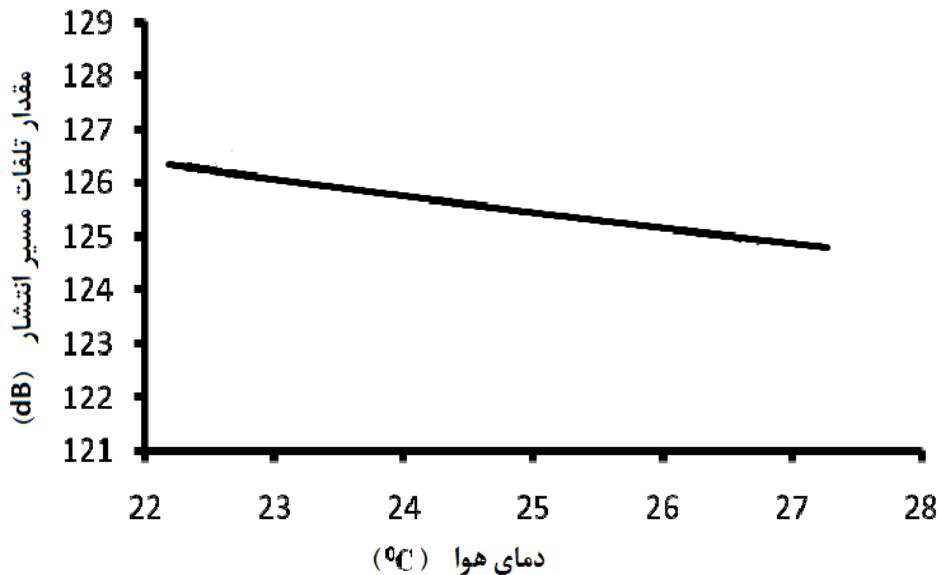


شکل (۳-۵) مقدار تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از رطوبت نسبی هوا [۳۳]

۳-۴-۲- دمای هوا

با توجه به (۱-۴) پارامتر دیگری که بر روی مقدار ϵ_r و در نتیجه بر روی میزان تضعیف انرژی امواج منتشر شده در هوا تأثیر می‌گذارد، دمای هوا می‌باشد. عوامل متعددی از جمله: فصول و طول روز، جریان‌های اقیانوسی، باد، عرض جغرافیایی و ... بر روی دمای هوا تأثیر گذار می‌باشند.

در شکل ۳-۶ چگونگی تغییرات تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از دمای هوا قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳-۶) مقدار تلفات مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از دمای هوا [۳۳]

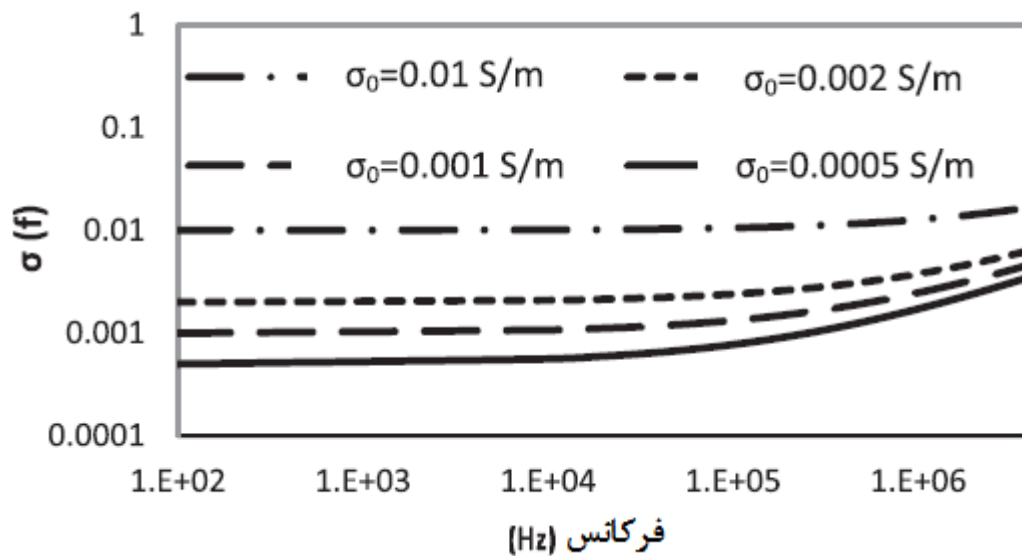
۳-۴-۳- فشار هوا

اولین بار در قرن هفدهم توریچلی^۱ ثابت نمود که هوا دارای وزن می‌باشد و با اعلام وزن و فشار هوا، فشارسنج جیوه‌ای خود را در سال ۱۶۴۲ اختراع نمود [۳۲]. فشار هوا نیرویی است که هوا بر یک واحد از سطح زمین وارد می‌کند و مقدار آن در سطح دریای آزاد، برابر با وزن ستونی از جیوه به ارتفاع ۷۶۰ mmHg می‌باشد. ضخامت قشر هوایی که اطراف کره زمین را احاطه نموده به کیلومترها می‌رسد. وزن لایه‌های هوا که روی هم انباشته شده‌اند فشار زیادی به طبقات زیرین آن وارد می‌سازد. سه‌چهارم هوایی که اطراف کره زمین را در بر گرفته است بین سطح دریا تا ۱۰ کیلومتری از سطح زمین جای گرفته است، بنابراین سنگین‌ترین فشار حاصله بر لایه‌های پایینی هوا وارد می‌گردد و سبک‌ترین فشار به بالاترین لایه‌های آن می‌رسد. نتیجه اینکه هر چه ارتفاع از سطح زمین بیشتر شود با یک نسبتی، از فشار و وزن هوا کاسته می‌شود.

¹Torricelli

۳-۵- وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس

بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی که در طول سالیان گذشته انجام شده، به خوبی روشن گردیده است که رسانایی الکتریکی زمین کاملاً وابسته به فرکانس می‌باشد [۳۴]. از آنجایی که تا چند سال قبل هیچ فرمول و عبارت کلی و دقیقی برای بیان رابطه رسانایی الکتریکی زمین ارائه نشده بود در تمام مطالعات قبلی مربوط به اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی از مقدار رسانایی الکتریکی زمین یا چشم پوشی شده و یا برای آن یک عدد ثابت نسبت داده شده است. در مطالعات قبلی با اتخاذ یک رویکرد محافظه کارانه، مقدار رسانایی الکتریکی زمین به وسیله ادواتی که در فرکانس‌های پایین کاربرد دارند اندازه‌گیری شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵]. مطمئناً این عمل موجب به دست آمدن جواب‌هایی با تقریب زیاد و غیرواقعی می‌گردد. در عمل و در واقعیت مقدار رسانایی الکتریکی زمین وابسته به فرکانس می‌باشد و با تغییر فرکانس مقدار رسانایی الکتریکی زمین نیز تغییر می‌نماید. در شکل ۳-۷ نحوه وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس نشان داده شده است. از آنجایی که اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی دارای فرکانسی در محدوده چند صد هرتز تا چندین مگاهرتز می‌باشد [۳۶]، پس لازم است که در روابط تحلیلی ارائه شده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی، رسانایی الکتریکی زمین به صورت تابعی از فرکانس در نظر گرفته شود تا نتایج به دست آمده دقیق‌تر و واقعی‌تر گردند.



شکل (۳-۷) رسانایی الکتریکی زمین به ازای تغییرات فرکانس [۳۴]

در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های بالاتر میزان تأثیرگذاری فرکانس بر روی مقدار رسانایی الکتریکی زمین بیشتر می‌باشد.

مقاومت الکتریکی زمین (یا رسانایی الکتریکی زمین) به عوامل مختلفی مانند نوع خاک زمین، ترکیب شیمیایی املاح محلول آب موجود در خاک، رطوبت خاک، دمای خاک، اندازه دانه‌های خاک، توزیع دانه‌ها و میزان تراکم خاک بستگی دارد [۳۷]. در حقیقت مقاومت الکتریکی زمین بستگی زیادی به نوع خاک داشته و بر اساس مطالعات انجام شده محدوده مقاومت الکتریکی خاک‌های باغچه‌ای ۵ تا ۵۰ اهم‌متر، خاک‌های رسی ۸ تا ۵۰ اهم‌متر، خاک مخلوط‌های رسی، ماسه‌ای و شنی ۲۵ تا ۳۰ اهم‌متر، شن و ماسه ۶۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر و مقاومت زمین‌های سنگلاخی و سنگی ۲۰۰ الی ۱۰۰۰۰ اهم‌متر می‌باشد [۳۸]. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه نتیجه می‌شود که هر چقدر میزان رس موجود در خاک بیشتر باشد مقاومت الکتریکی زمین کمتر می‌گردد، چرا که خاک‌های رسی به دلیل اندازه دانه‌های بسیار ریزی که دارند تماس بسیار خوبی با هم ایجاد می‌نمایند که این امر باعث رساناتر شدن آنها می‌گردد. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر مقاومت الکتریکی زمین، میزان رطوبت خاک می‌باشد و با افزایش درصد رطوبت، خصوصاً در خاک‌های رسی که قابلیت آبگیری نسبتاً بالایی دارند میزان مقاومت الکتریکی زمین کاهش می‌یابد، طوری که مقاومت الکتریکی خاک رس با ۱۰٪ رطوبت ۳۰ برابر بیشتر از شرایط ۲۰٪ رطوبت می‌باشد. همچنین به دلیل مقاومت پایین آب‌های شور حاوی املاح نمک‌های مختلف، خاک‌های محتوی نمک نیز دارای مقاومت الکتریکی کمتری می‌باشند [۳۸]. با توجه به مقادیر مطرح شده برای مقاومت الکتریکی انواع مختلف زمین می‌توان بیان نمود که رسانایی الکتریکی زمینی که خطوط هوایی توزیع برق از بالای آن عبور می‌کند بسته به نوع خاک و شرایط اقلیمی می‌تواند مقداری در محدوده $0/0001 \text{ s/m}$ تا $0/2 \text{ s/m}$ داشته باشد.

نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی که توسط visacro و همکارانشان [۳۹] انجام شده به خوبی میزان تأثیرگذاری فرکانس بر روی مقدار رسانایی الکتریکی زمین را اثبات می‌نماید. در [۳۹] بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی که این آزمایش‌ها بر روی انواع مختلف خاک در ۳۱ سایت متفاوت و در طول یک دوره چند ماهه صورت گرفته است رابطه‌ای برای مقدار رسانایی الکتریکی زمین به صورت تابعی از فرکانس ارائه شده که به صورت رابطه (۳-۲۸) می‌باشد.

$$\sigma(f) = \sigma_{0g} \left[1 + (1.2 \times 10^{-6} \times \sigma_{0g}^{-0.73}) (f - 100)^{0.65} \right] \quad (3-28)$$

در (3-28) σ_{0g} رسانایی الکتریکی فرکانس پایین زمین و f نیز فرکانس می‌باشد که در محدوده 100 Hz تا 4 MHz قابل تغییر می‌باشد. در پایان نامه حاضر با استفاده از رابطه (3-28) تاثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

3-6- جمع‌بندی

برای مدل کردن کانال صاعقه در کل چهار نوع مدل در نظر گرفته شده است. مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه نسبت به مدل‌های دیگر از دقت و اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد و در گذشته به خاطر عدم در دسترس بودن ابزار مناسب برای حل مسائل مربوط به آن، مدل‌های دیگر به ویژه مدل مهندسی برای کانال صاعقه مورد استفاده قرار می‌گرفته است. عمده ایراد وارد شده به مدل مهندسی این می‌باشد که این مدل جنبه‌های فیزیکی که مربوط به ذات صاعقه هستند را در نظر نمی‌گیرد و تمرکز آنها بیشتر بر روی میدان‌های الکترومغناطیسی تولید شده بوسیله مدل و میدان‌های الکترومغناطیسی رسیده به نقطه مشاهده می‌باشد

به منظور ارزیابی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی شبکه توزیع با استفاده از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه در این فصل ابتدا مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه مطالعه گردید. در این راستا انواع مختلف مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه معرفی شده و برای نوع استفاده شده در این مطالعات ثابت انتشار، سرعت انتشار فاز و امپدانس مشخصه کانال صاعقه ارائه شده است. همچنین در ادامه الگوریتم تفاضلی محدود در حوزه زمان به طور کامل تشریح گردیده و روابط حل مسئله مربوط به این روش معرفی شدند.

در بخش 3-3 تاثیر شرایط محیطی بر روی نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی تشریح گردیده و ارتباط شرایط محیطی با میزان تضعیف امواج الکترومغناطیسی و مقدار تلفات مسیر انتشار امواج در هوا بررسی شد. در بخش 3-4 نیز مقدار مقاومت الکتریکی انواع مختلف خاک معرفی شده و چگونگی وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس تشریح گردید.

۴- فصل چهارم :

نتایج و تفسیر آنها

۴-۱- مقدمه

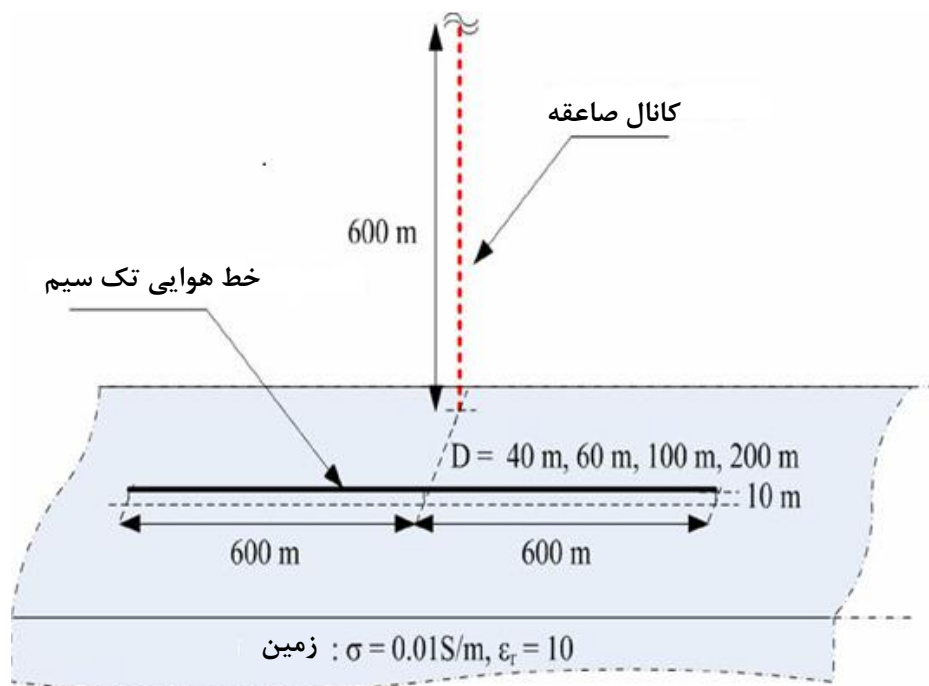
با توجه به مطالعات صورت گرفته در پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود که عملکرد خطوط هوایی در هنگام صاعقه به پارامترهای مختلفی همچون هدایت الکتریکی زمین، ارتفاع هادی فاز، ارتفاع سیم گارد، مدل استفاده شده برای جریان کانال صاعقه و زمان پیشانی موج صاعقه وابسته می‌باشد. یکی از عوامل دیگری که بر مقدار ولتاژ القا شده در خطوط هوایی تأثیر می‌گذارد شرایط محیطی می‌باشد. این عامل در هیچ یک از مطالعات قبلی مرتبط با این بحث مورد بحث قرار نگرفته است. در این فصل از پایان‌نامه میزان و نحوه اثر گذاری شرایط محیطی بر روی مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر روی مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در شبکه توزیع رسانی الکتریکی زمین می‌باشد که این پارامتر در اسناد علمی متعددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در همه این اسناد علمی رسانی الکتریکی زمین یک مقدار ثابت فرض شده است در حالی که رسانی الکتریکی تابعی از فرکانس می‌باشد. در ادامه مطالعات این فصل از پایان‌نامه، تأثیر وابسته در نظر گرفتن رسانی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

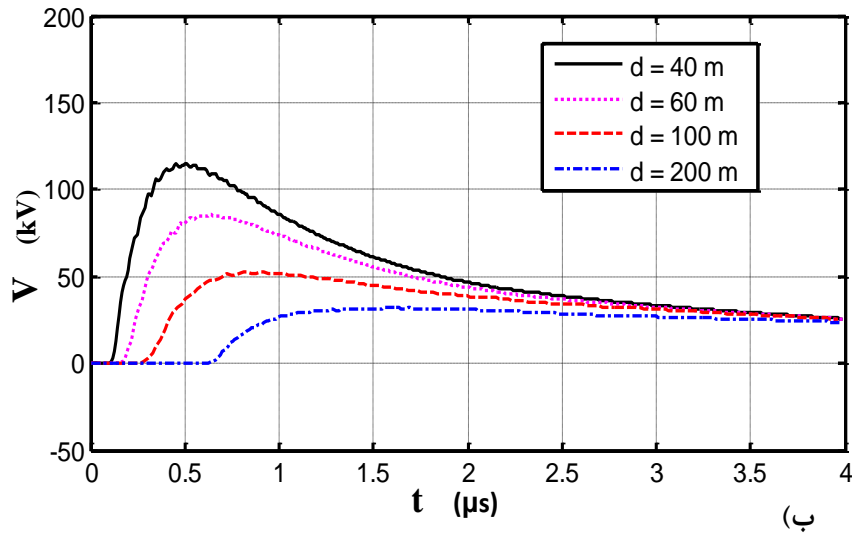
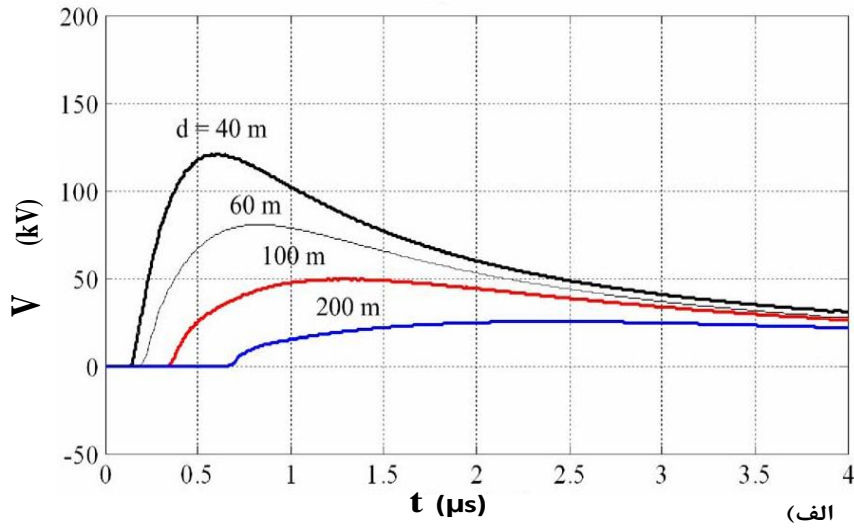
۴-۲- شبیه‌سازی مسئله مورد نظر

یکی از ویژگی‌های اصلی پایان‌نامه حاضر این می‌باشد که مطالعات صورت گرفته در این پایان‌نامه توسط نرم‌افزار CST انجام شده به طوری که تاکنون نرم‌افزار CST در این مبحث مورد استفاده قرار نگرفته است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مدنظر بر روی شکل موج اضافه ولتاژ القایی صاعقه، مطالعات بر روی یک سیستم نمونه که در مقالات معتبر متعددی مورد استفاده قرار گرفته، انجام شده است [۴۰]. در شکل ۴-۱ نمای تک خطی این سیستم نمونه نشان داده شده است. این سیستم از یک خط هوایی مسی به طول ۱۲۰۰ متر و شعاع ۰/۵ میلی‌متر تشکیل شده که در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است.

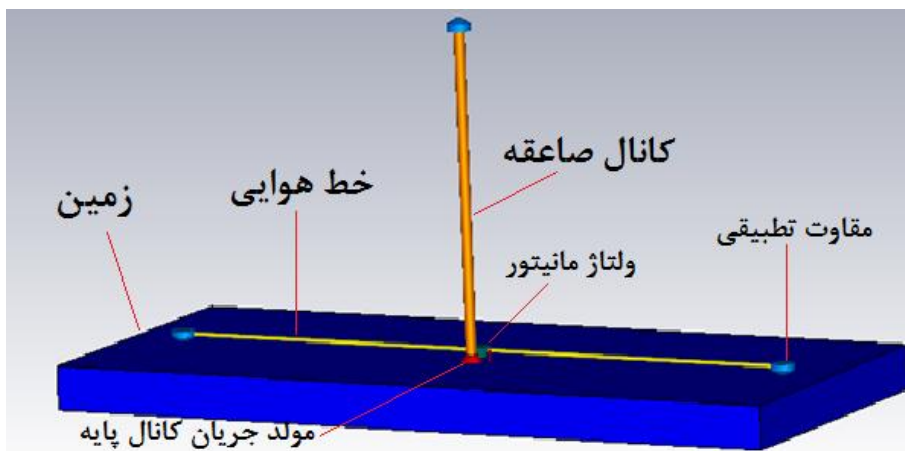
در شبیه‌سازی صورت گرفته در مرجع [۴۰] هر دو انتهای خط هوایی به مقاومت تطبیقی 498Ω ختم شده‌اند و همچنین مقدار رسانایی الکتریکی زمین برابر 0.1 s/m و مقدار گذردهی الکتریکی نسبی زمین نیز برابر ۱۰ اتخاذ شده است. در مرجع [۴۰] سرعت جریان کانال پایه در طول کانال صاعقه برابر یک سوم سرعت نور در فضای آزاد کانال اتخاذ شده و کانال صاعقه با طول ۶۰۰ متر به صورت مستقیم و عمود بر زمین فرض شده است. در مرجع [۴۰] برای جریان کانال پایه صاعقه از مدلی که توسط آقای هایدلر معرفی گردیده، استفاده شده و مقدار I_m برابر 11 kA در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که کانال صاعقه به صورت مستقیم و عمود بر زمین در فواصل مختلف از خط هوایی به زمین برخورد می‌کند. ولتاژهای القایی ناشی از صاعقه هم دقیقاً در وسط خط هوایی محاسبه شده‌اند. برای اینکه اعتبار نرم‌افزار استفاده شده در این پایان‌نامه سنجیده شود سیستم نمونه مورد بررسی قرار گرفته در مرجع [۴۰] دقیقاً با همان مشخصات معرفی شده در آن، توسط نرم‌افزار CST مورد شبیه‌سازی قرار گرفته که نتایج مربوط به مرجع [۴۰] و نتایج حاصل از نرم‌افزار CST در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. در شکل ۴-۳ نیز نحوه مدل کردن سیستم مورد مطالعه در نرم‌افزار CST نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) نمای کلی سیستم به کار رفته برای مطالعات [۴۰]



شکل (۲-۴) شکل موج اضافه ولتاژهای القایی ناشی از صاعقه در فاصله‌های مختلف از خط هوایی
الف) نتایج مرجع [۴۰] ب) نتایج به دست آمده از نرم‌افزار CST



شکل (۳-۴) سیستم مدل شده در نرم‌افزار CST

۴-۳- تأثیر شرایط محیطی بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه

تقریباً همه مطالعات انجام شده در رابطه با اضافه ولتاژ القایی ناشی از پدیده صاعقه در خطوط توزیع هوایی از تأثیر شرایط محیطی بر روی این اضافه ولتاژها چشم پوشی نموده و اینطور فرض کرده‌اند که فضای اطراف سیستم مورد مطالعه هوای استاندارد می‌باشد. مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی کاملاً وابسته به شدت میدان‌های الکترومغناطیسی منتشر شده در هوا می‌باشد. انرژی امواج منتشر شده در هوا رابطه بسیار تنگاتنگی با مقدار گذردهی الکتریکی نسبی هوا (ϵ_r) دارد به طوری که با تغییر مقدار ϵ_r ، انرژی امواج منتشر شده در فضای بالای زمین نیز دچار تغییر می‌شود و به تبع آن مقدار ولتاژ القا شده در خطوط هوایی شبکه توزیع نیز تغییر می‌نماید.

در این قسمت از مطالعات صورت گرفته در پایان‌نامه حاضر سعی شده است با استفاده از رابطه (۳-۲۶) برای بدست آوردن مقدار دقیق ϵ_r ، به ازای تغییر پارامترهای رطوبت نسبی، فشار و دمای هوا اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۳-۱- تأثیر تغییرات رطوبت نسبی هوا

تأثیر اولین پارامتری که در قالب شرایط محیطی بر روی اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه مورد بررسی واقع شده رطوبت نسبی هوا می‌باشد. در این مطالعه برای اینکه تأثیر مقدار رطوبت نسبی هوا بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه مورد بررسی قرار گیرد برای سه مقدار متفاوت آن (۷۰٪ و ۵۰ و ۳۰ RH) محاسبات تکرار شده و با نتایج مربوط به اضافه ولتاژهای بدست آمده در شرایط هوای خشک مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج مربوط به این عمل در جدول ۴-۱ درج شده است. لازم به ذکر است که عبارت ΔV در ستون چهارم مربوط به جداول ۴-۱ تا ۴-۴، نشان دهنده درصد اختلاف مقدار بیشینه دامنه اضافه ولتاژ القایی در شرایط استاندارد با شرایط غیراستاندارد می‌باشد ($\Delta V = \frac{V_{max,normal} - V_{max,unnormal}}{V_{max,normal}} \times 100$). برای محاسبات صورت گرفته مربوط به این قسمت مقادیر پارامترهای P و T به طور میانگین به ترتیب برابر ۷۶۰ mmHg و ۲۰ °C اتخاذ شده‌اند.

جدول (۴-۱) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات رطوبت نسبی هوا (RH)

RH (%)	ϵ_r	V_{max} (kV) شرایط غیراستاندارد	ΔV (%)
۳۰	۱/۰۰۱۲۰	۵۰/۲۱	۹/۲۵
۵۰	۱/۰۰۱۲۶	۴۹/۴۳	۱۰/۶۶
۷۰	۱/۰۰۱۳۱	۴۸/۵۳	۱۲/۲۹

۴-۳-۲- تأثیر تغییرات فشار هوا

در مطالعات صورت گرفته در این قسمت از پایان نامه برای اینکه بتوان تأثیر تغییر فشار هوا را بر روی موج اضافه ولتاژ القایی صاعقه مورد بررسی قرار داد در سه مقدار مختلف اتخاذ شده برای فشار هوا (۵۸۰ mmHg و ۶۶۸ و ۷۶۰ mmHg) محاسبات تکرار شده و نتایج به دست آمده در جدول ۴-۲ درج گردیده است. در محاسبات انجام شده مربوط به این قسمت مقادیر پارامترهای RH و T به طور میانگین به ترتیب برابر ۵۰٪ و ۲۰ °C انتخاب شده‌اند.

جدول (۴-۲) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات فشار هوا (P)

P (mmHg)	ϵ_r	V_{max} (kV) شرایط غیراستاندارد	ΔV (%)
۷۶۰	۱/۰۰۱۲۶	۴۹/۴۳	۱۰/۶۶
۶۶۸	۱/۰۰۱۱۸	۵۰/۱۸	۹/۳۰
۵۸۰	۱/۰۰۱۱۱	۵۱/۰۲	۷/۷۹

۴-۳-۳- تأثیر تغییرات دمای هوا

برای اینکه تأثیر تغییر دمای هوای بر روی اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه مورد ارزیابی قرار گیرد برای سه مقدار مختلف اتخاذ شده برای این پارامتر (۳۰ °C و ۲۰ و ۱۰ °C) محاسبات تکرار شده و نتایج به دست آمده در جدول ۴-۳ درج شده است. در محاسبات مربوط به این

قسمت مقادیر پارامترهای RH و P به طور میانگین به ترتیب برابر ۵۰٪ و ۷۶۰ mmHg انتخاب شده‌اند.

جدول (۳-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژ القایی صاعقه با تغییرات دمای هوا (T)

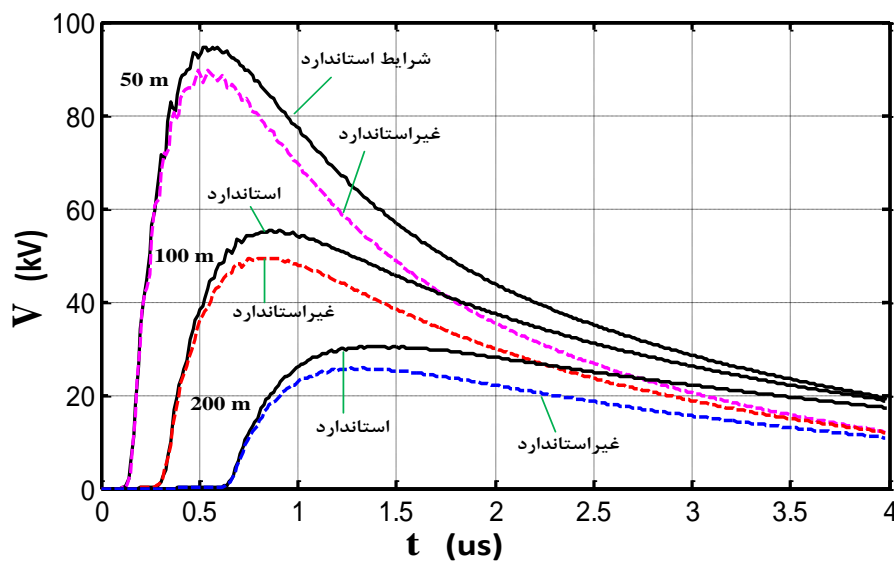
T (°C)	ϵ_r	V_{max} (kV) شرایط غیراستاندارد	ΔV (%)
۱۰	۱/۰۰۱۲۰	۵۰/۲۰	۹/۲۷
۲۰	۱/۰۰۱۲۶	۴۹/۴۳	۱۰/۶۶
۳۰	۱/۰۰۱۳۰	۴۸/۵۵	۱۲/۲۵

۴-۳-۴- میزان اثرگذاری ϵ_r هوا با توجه به فاصله کانال صاعقه از خط هوایی

تلفات مسیر انتشار یکی از مباحث مهم در بحث انتشار امواج الکترومغناطیسی می‌باشد به طوری که امواج الکترومغناطیسی هرچقدر مسافت بیشتری را در یک محیط طی نمایند انرژی آنها بیشتر تلف شده و تضعیف می‌گردند. تلفات مسیر انتشار در هوای آزاد کاملاً وابسته به شرایط محیطی می‌باشد به گونه‌ای که با تغییر عواملی همچون رطوبت نسبی و دمای هوا مقدار تلفات مسیر نیز تغییر می‌کند. مقدار و میزان تلفات انرژی امواج الکتریکی به عوامل متعددی وابسته می‌باشد که یکی از مهم‌ترین این عوامل مقدار گذردهی الکتریکی محیط انتشار می‌باشد. طوری که بزرگ‌تر بودن مقدار گذردهی الکتریکی نسبی یک محیط نشان دهنده عایق‌تر و مقاوم‌تر بودن آن محیط در برابر انتشار امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. در ادامه مطالعات، میزان اثرگذاری تغییرات ϵ_r هوا بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه برای فاصله‌های مختلف کانال صاعقه از خط هوایی مورد ارزیابی قرار گرفته است که در جدول ۴-۴ نتایج مربوط به آن درج گردیده است. برای محاسبات صورت گرفته مربوط به این قسمت مقادیر پارامترهای P, RH و T به طور میانگین به ترتیب برابر ۵۰٪، ۷۶۰ mmHg و ۲۰ °C اتخاذ شده‌اند. شکل ۴-۴، تصویر موج اضافه ولتاژهای القایی صاعقه به دست آمده در فواصل مختلف کانال صاعقه از خط هوایی را در شرایط استاندارد و غیراستاندارد نشان می‌دهد.

جدول (۴-۴) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژهای القایی در فواصل مختلف کانال صاعقه از خط هوایی در شرایط استاندارد و غیراستاندارد

d (m)	V_{max} (kV) شرایط استاندارد	V_{max} (kV) شرایط غیراستاندارد	ΔV (%)
۵۰	۹۴/۶۶	۸۹/۶۷	۵/۲۷
۱۰۰	۵۵/۳۳	۴۹/۴۲	۱۰/۶۸
۲۰۰	۳۰/۵۲	۲۵/۸۵	۱۵/۳۰



شکل (۴-۴) اضافه ولتاژهای القایی به دست آمده برای فواصل مختلف کانال صاعقه از خط هوایی در شرایط استاندارد و غیراستاندارد

اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی شبکه توزیع در نتیجه تزویج امواج الکترومغناطیسی با هادی خط هوایی به وجود می‌آید، به طوری که هر چه مقدار ϵ_r محیط بزرگ‌تر باشد مقدار انرژی امواج رسیده به هادی خط هوایی کمتر شده و به دنبال آن مقدار اضافه ولتاژ القا شده در آن کوچک‌تر می‌گردد. دلیل کوچک‌تر بودن مقدار اضافه ولتاژ القا شده در یک محیط با ϵ_r بزرگ‌تر ناشی از این موضوع می‌باشد که در یک محیط با مقدار ϵ_r بزرگ‌تر، نیروی جاذبه بین یون‌ها کاهش می‌یابد و این امر باعث کاهش رسانایی یون‌ها و افزایش ضریب تضعیف آنها می‌گردد. با افزایش ضریب تضعیف در یک محیط مقدار تلفات مسیر انتشار در آن محیط

افزایش می‌یابد. به طوریکه در یک محیط عمومی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب بر اساس روابط (۱-۴) و (۲-۴) تعریف می‌گردند [۴۱].

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z) \quad (1-4)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z) \quad (2-4)$$

در روابط (۱-۴) و (۲-۴) ضریب تضعیف α و ثابت انتشار موج می‌باشد که در یک محیط عمومی با شرط $\epsilon_r \gg 60\lambda_0\sigma$ به صورت روابط (۳-۴) و (۴-۴) تعریف می‌گردند [۴۱].

$$\alpha \cong \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-4)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4-4)$$

در روابط (۳-۴) و (۴-۴) λ طول موج و σ رسانایی الکتریکی محیط انتشار موج می‌باشد. از رابطه (۳-۴) اینگونه نتیجه می‌شود که در یک محیط با مقدار ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ_r) بزرگ‌تر امواج الکترومغناطیسی بیشتر تضعیف شده و زودتر میرا می‌گردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها که در شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸ نشان داده شده‌اند نیز با این اظهارات هم‌سو می‌باشند. در شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸ نحوه توزیع اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی در ارتفاع ۹/۹۸ متری (دقیقاً زیر خط هوایی) برای شرایط مختلف آب و هوایی نشان داده شده است.

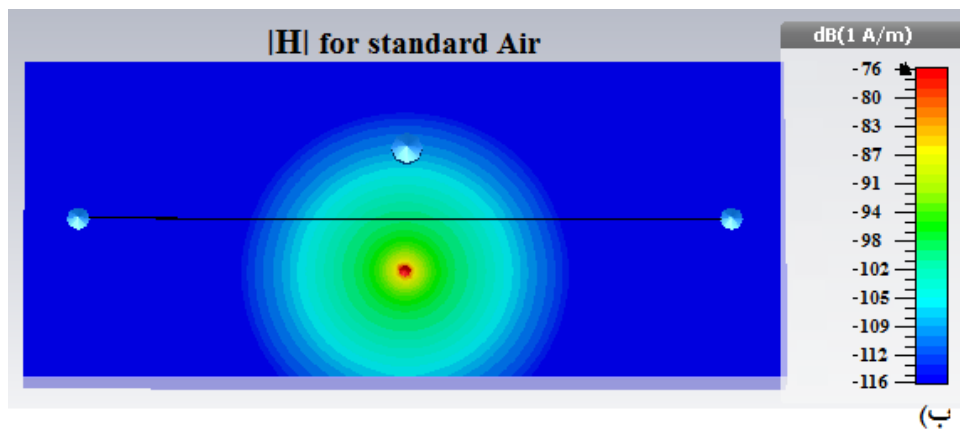
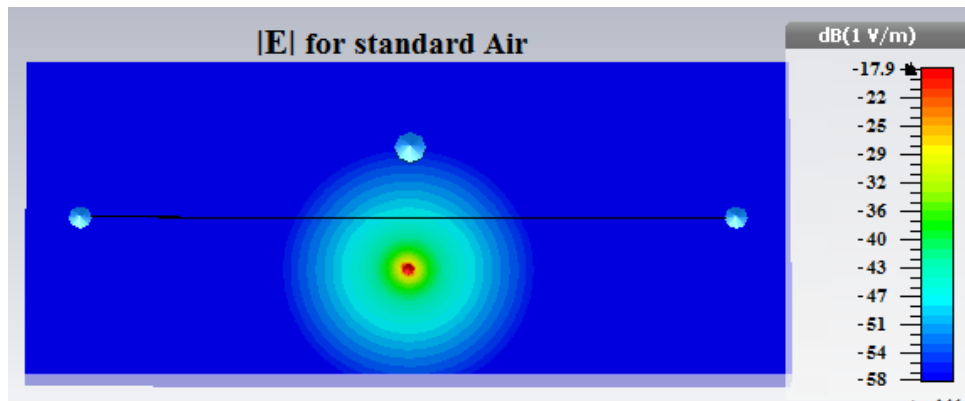
در شکل ۴-۵ اندازه میدان الکترومغناطیسی برای هوای استاندارد و در شکل ۴-۶ اندازه میدان الکترومغناطیسی برای حالاتی که رطوبت نسبی هوا برابر ۳۰ و ۷۰٪ باشد، قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۴-۷ نحوه توزیع میدان الکترومغناطیسی در ارتفاع ۹/۹۸ متری برای شرایط آب و هوایی موجود در ارتفاع ۱۰ و ۲۰۰۰ متری از سطح دریا نشان داده شده است. در شکل ۴-۸ نحوه توزیع میدان الکترومغناطیسی در زیر خط هوایی برای حالتی که دمای هوا ۱۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل‌های ۴-۵ مشاهده می‌شود در حالتی که هوای اطراف خطوط هوایی هوای خشک در نظر گرفته شود دقیقاً زیر خط هوایی بیشینه مقدار اندازه میدان الکتریکی برابر $17/9 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ و بیشینه مقدار اندازه میدان مغناطیسی برابر $79 \text{ dB}(\text{A}/\text{m})$ می‌باشد در حالی که وقتی فرض می‌شود که هوای اطراف خطوط هوایی دارای رطوبت ۳۰٪ و ۷۰٪ باشند با توجه به شکل ۴-۶ بیشینه مقدار اندازه میدان الکتریکی به ترتیب برابر $21 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ و $20 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ و بیشینه مقدار اندازه

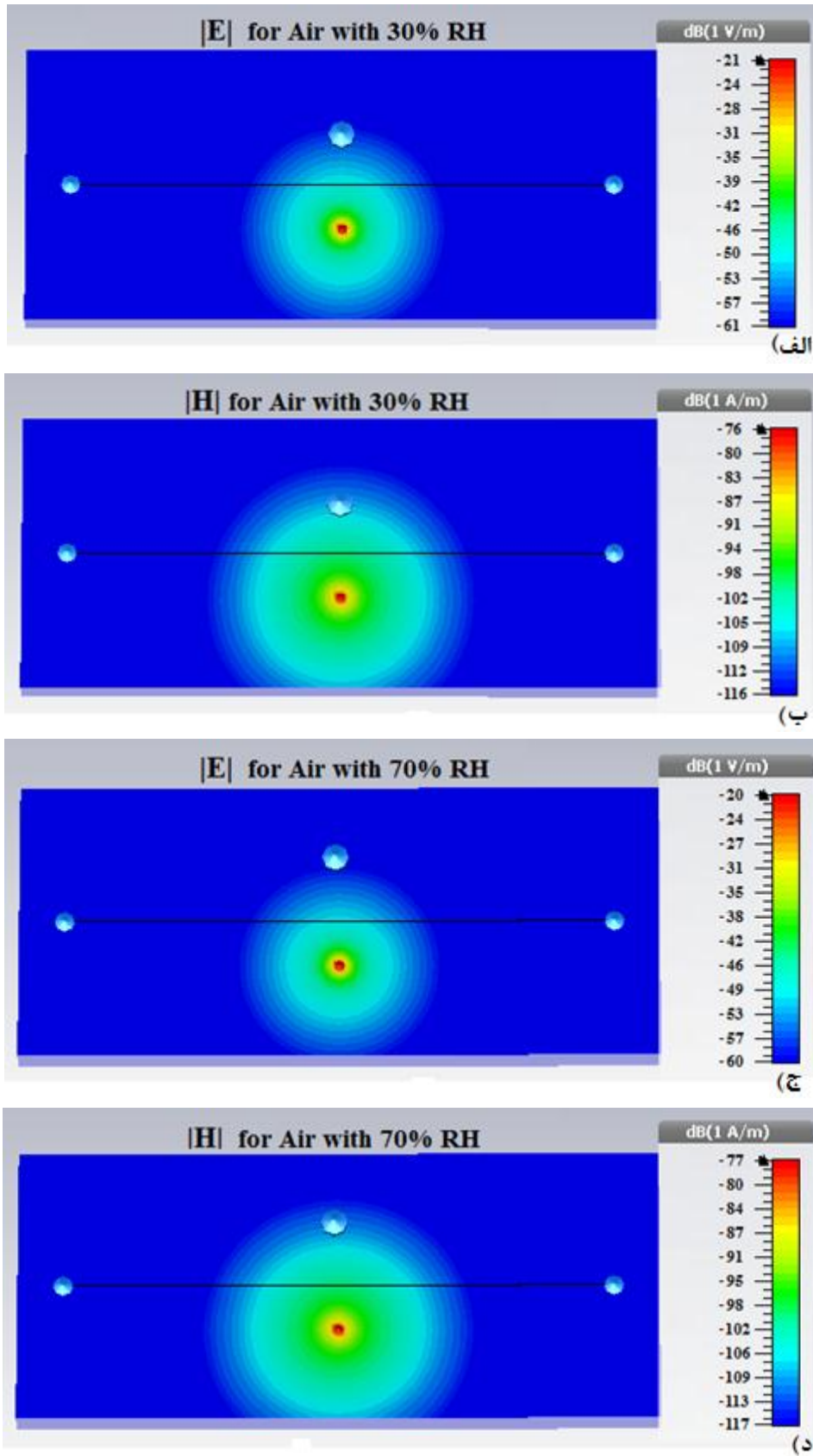
میدان مغناطیسی به ترتیب برابر $-76 \text{ dB}(A/m)$ و $-77 \text{ dB}(A/m)$ می‌باشد. در جدول ۴-۵ بیشینه مقدار اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی برای شرایط محیطی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته درج گردیده است.

جدول (۴-۵) بیشینه مقدار اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی در وضعیت‌های مختلف شرایط محیطی

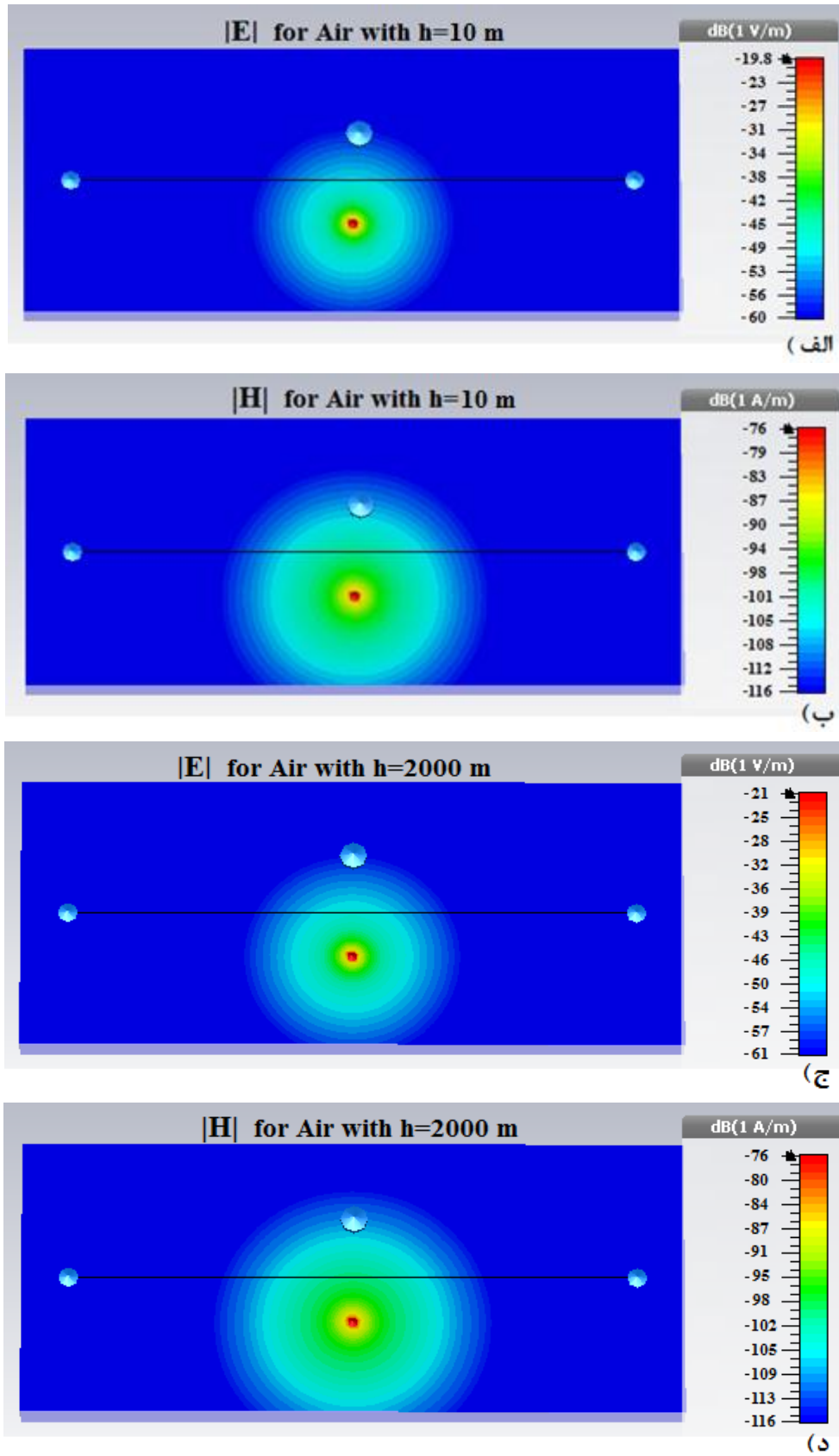
وضعیت شرایط محیطی	بیشینه مقدار اندازه میدان الکتریکی $\text{dB}(V/m)$	بیشینه مقدار اندازه میدان مغناطیسی $\text{dB}(A/m)$
هوای خشک	-۱۷/۹	-۷۹
هوا با رطوبت نسبی ۳۰٪	-۲۱	-۷۶
هوا با رطوبت نسبی ۷۰٪	-۲۰	-۷۷
هوا در ارتفاع ۱۰m از سطح آب‌های آزاد	-۱۹/۸	-۷۶
هوا در ارتفاع ۲۰۰۰m از سطح آب‌های آزاد	-۲۱	-۷۶
هوا با دمای 10°C	-۲۱	-۷۶
هوا با دمای 30°C	-۲۰	-۷۷



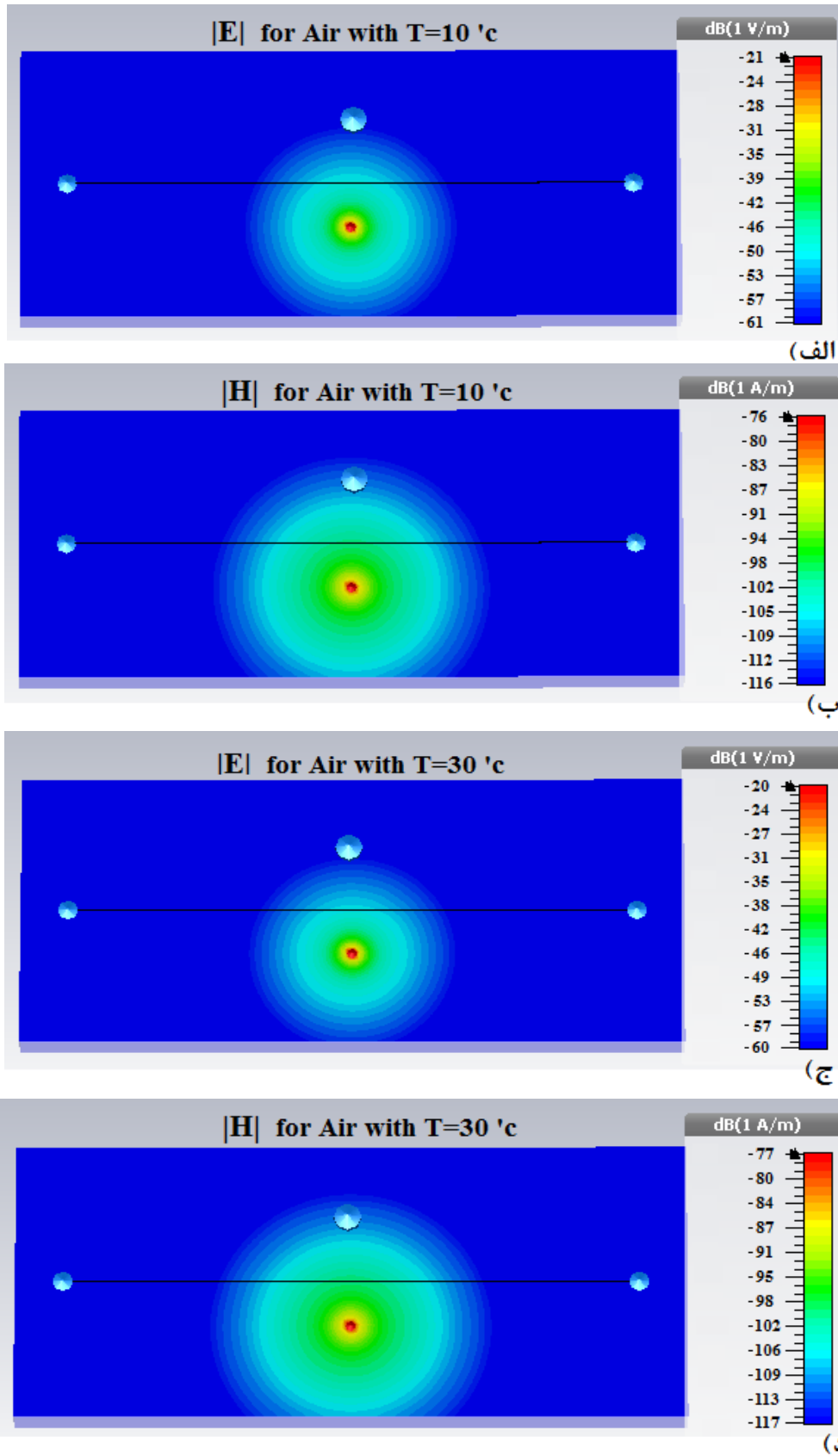
شکل (۴-۵) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی دقیقاً در زیر خط هوایی برای وضعیت هوای خشک



شکل (۴-۶) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی دقیقاً در زیر خط هوایی هوا با رطوبت نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد



شکل (۴-۷) اندازه میدان‌های الکترومغناطیسی دقیقاً در زیر خط هوایی برای هوای در ارتفاع ۱۰ و ۲۰۰۰ متری



شکل (۴-۸) اندازه میدان الکترومغناطیسی دقیقاً در زیر خط هوایی برای هوا با دمای ۱۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد

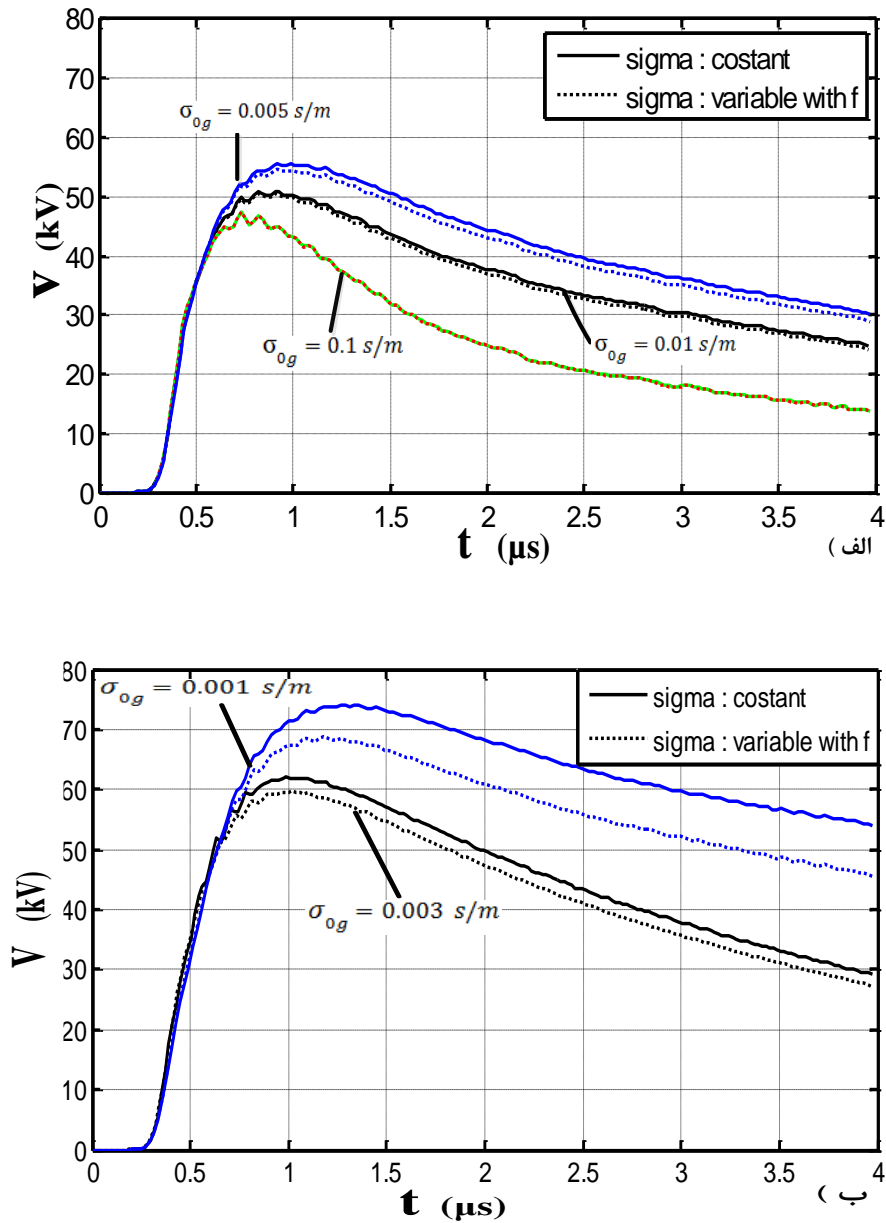
با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات این قسمت از پایان نامه می توان بیان نمود که با افزایش مقدار رطوبت نسبی هوا مقدار ϵ_r هوا افزایش یافته و به دنبال آن مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی کاهش می یابد. از طرفی دیگر با افزایش ارتفاع محل نصب خط هوایی نسب به سطح آب های آزاد، فشار هوا در آن نقطه کاهش یافته و به دنبال آن مقدار ϵ_r هوا کاهش می یابد و در نتیجه با افزایش ارتفاع مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خط هوایی افزایش می یابد. همچنین با افزایش دمای هوا، مقدار ϵ_r هوا افزایش یافته و در نتیجه مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی کاهش می یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش فاصله کانال صاعقه از خط هوایی میزان تأثیر گذاری تغییرات ϵ_r هوا که خود آن ناشی از تغییرات شرایط محیطی است بر روی مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه افزایش می یابد، چرا که با افزایش فاصله کانال صاعقه از خط هوایی، امواج الکترومغناطیسی صاعقه برای رسیدن به خط هوایی فاصله زیادتری باید را در هوایی که ϵ_r آن بزرگ تر است طی کنند که این امر باعث تضعیف هر چه بیشتر انرژی امواج الکترومغناطیسی می شود.

۴-۴- تأثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی ولتاژ القایی

بسیاری از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی به دلیل پیچیدگی حل الکترومغناطیسی مسئله، بدون در نظر گرفتن نقش رسانایی الکتریکی زمین انجام شده اند. اما در ادامه کار محققان اثبات نمودند که مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خطوط هوایی کاملاً وابسته به مقدار رسانایی الکتریکی زمین زیر خط هوایی می باشد. از طرف دیگر مقدار رسانایی الکتریکی زمین نیز به فرکانس وابسته می باشد که این موضوع در بسیاری از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با سیستم زمین سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. ولی در هیچ یک از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی، تأثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس لحاظ نشده و محققان در مطالعات خود برای رسانایی الکتریکی زمین یک مقدار ثابت اتخاذ نموده اند.

در مطالعات انجام شده در این قسمت از پایان نامه، با در نظر گرفتن وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس و اعمال (۳-۲۸)، اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی سیستم نشان داده شده در شکل ۴-۱ مورد محاسبه قرار گرفته است و با وضعیتی که رسانایی الکتریکی زمین مقدار

ثابتی در نظر گرفته شود مورد مقایسه قرار گرفته که در شکل ۴-۹ و جدول ۴-۶ نتایج مربوط به آن آورده شده است. در شبیه‌سازی‌های مربوط به این قسمت نیز فاصله کانال صاعقه از خط هوایی ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۹) اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس

جدول (۴-۶) نتایج به دست آمده برای اضافه ولتاژهای القایی صاعقه در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس

σ_{0g} (s/m)	V_p (kV) (σ_g constant)	V_p (kV) (σ_g variable)	ΔV (%)
۰/۱	۴۸/۷۵	۴۸/۷۴	۰/۰۲۰
۰/۰۱	۵۲/۹۴	۵۲/۵۵	۰/۷۴
۰/۰۰۵	۵۷/۷۹	۵۵/۸۰	۳/۴۴
۰/۰۰۳	۶۲/۲۱	۵۹/۶۳	۴/۱۵
۰/۰۰۱	۷۵/۱۶	۶۹/۷۶	۷/۱۸

در ستون چهارم جدول ۴-۶ عبارت ΔV نشان دهنده درصد اختلاف مقدار حداکثر اضافه ولتاژ القایی صاعقه در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس می باشد

$$(\Delta V = \frac{V_{p,\sigma \text{ constant}} - V_{p,\sigma \text{ variable}}}{V_{p,\sigma \text{ constant}}} \times 100)$$

با توجه به مطالعات صورت گرفته می توان بیان نمود که دلیل تغییر مقدار اضافه ولتاژ القا شده در خط هوایی با تغییر رسانایی الکتریکی زمین ناشی از این واقعیت می باشد که با تغییر مقدار رسانایی الکتریکی زمین مقدار ضریب تلفات خاک نیز تغییر می کند. در خاک با مقدار رسانایی الکتریکی کوچک، ضریب تلفات نیز مقدار پایین تری خواهد داشت و در خاک با مقدار رسانایی الکتریکی بالا مقدار ضریب تلفات نیز بزرگ خواهد بود. به عبارت دیگر زمین با مقدار رسانایی الکتریکی بالاتر یک محیط پراتلاف برای امواج الکترومغناطیس می باشد.

به دنبال متفاوت بودن مقدار ضریب تلفات خاک در رسانایی های مختلف، شدت میدان های الکترومغناطیسی تلف شده در خاک و رسیده به خط هوایی نیز متفاوت خواهد بود و به تبع آن مقدار ولتاژ القا شده در خط هوایی نیز فرق خواهد کرد. برای نشان دادن این ادعا برای دو مقدار رسانایی الکتریکی متفاوت زمین شبیه سازی ها تکرار شده و نتایج مربوط به آن در شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.

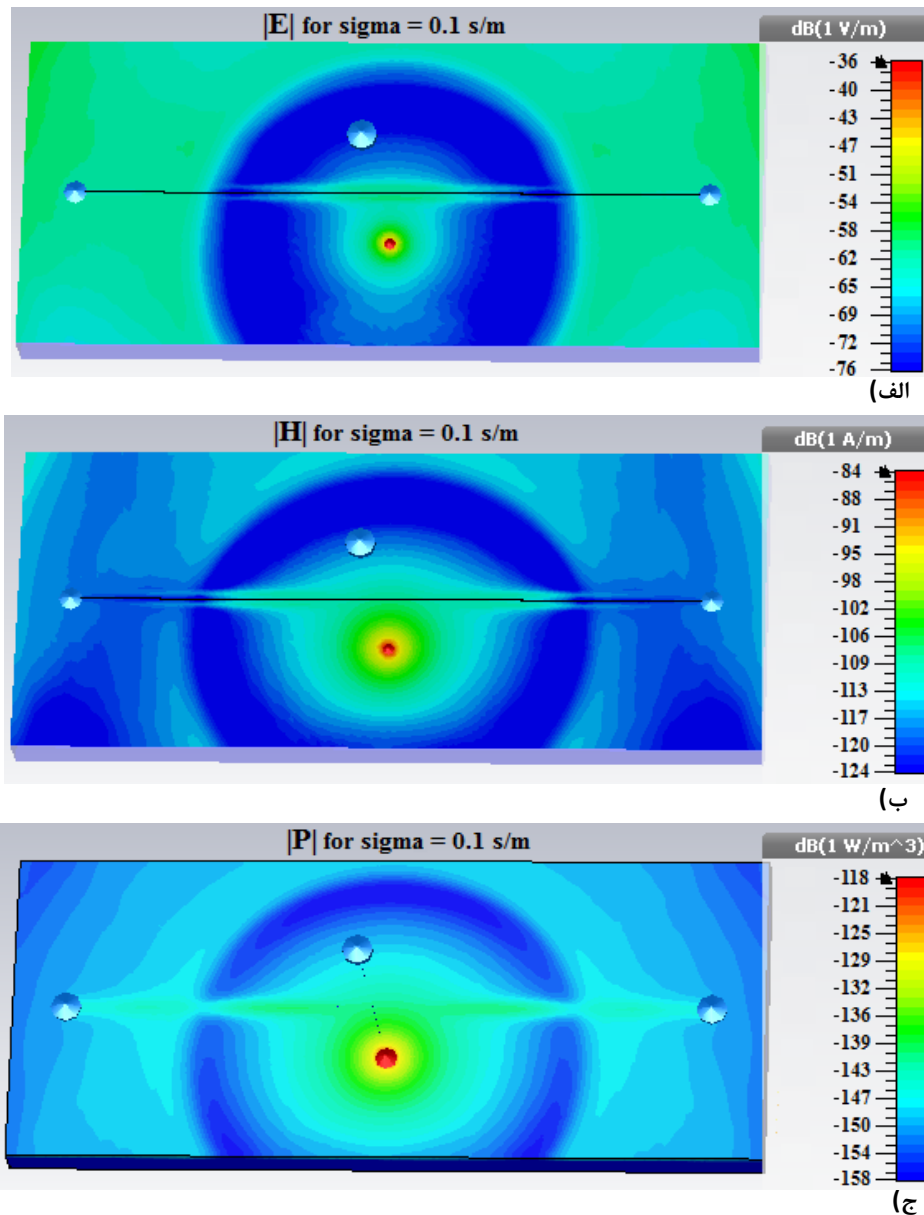
برای اثبات نتایج شبیه سازی، نتایج به دست آمده از این مطالعه را می توان با روابط معرفی شده در [۴۱] مقایسه نمود. در [۴۱] رابطه معرفی شده برای ضریب تلفات (α) امواج الکترومغناطیسی در یک محیط عمومی بدون هیچ شرط خاصی به صورت رابطه (۴-۵) می باشد.

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} p \quad (5-4)$$

در رابطه (5-4) :

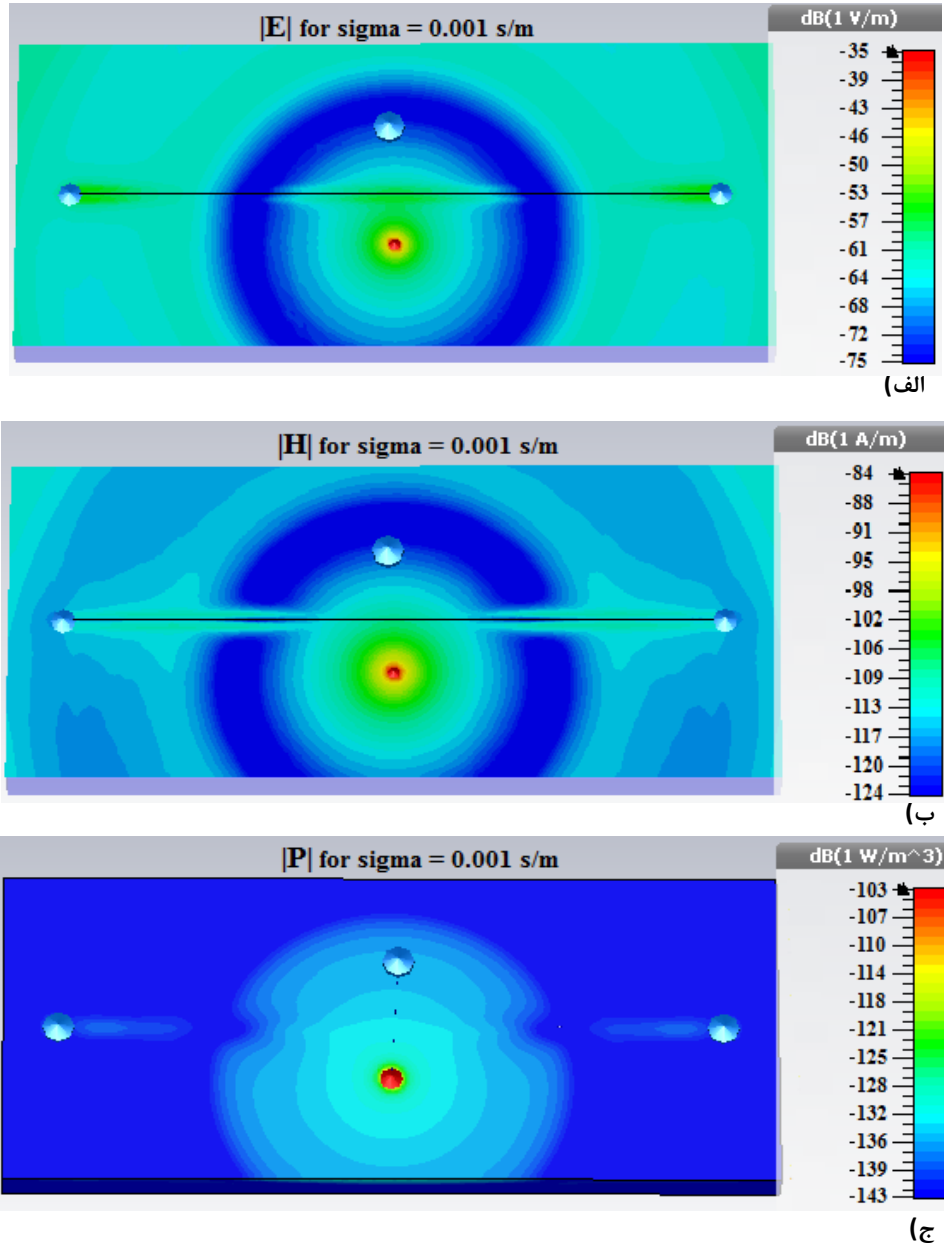
$$p = \sqrt{\frac{1}{2} \left[-\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r^2 + (60\lambda_0\sigma)^2} \right]} \quad (6-4)$$

و λ_0 طول موج امواج الکترومغناطیسی و σ رسانایی الکتریکی می باشد.



شکل (4-10) توزیع شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در ارتفاع 9/98 m و اندازه چگالی تلفات توان

در زمین برای $\sigma_g = 0/1$ s/m



شکل (۴-۱۱) توزیع شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در ارتفاع ۹/۹۸ m و اندازه چگالی تلفات توان

$$\text{در زمین برای } \sigma_g = 0/001 \text{ s/m}$$

روابط (۴-۵) و (۴-۶) به وضوح نشان می‌دهند که در یک محیط با مقدار رسانایی الکتریکی بزرگ‌تر مقدار ضریب تضعیف امواج الکترومغناطیسی بیشتر می‌باشد که با نتایج حاصل از این مطالعات سازگار می‌باشد.

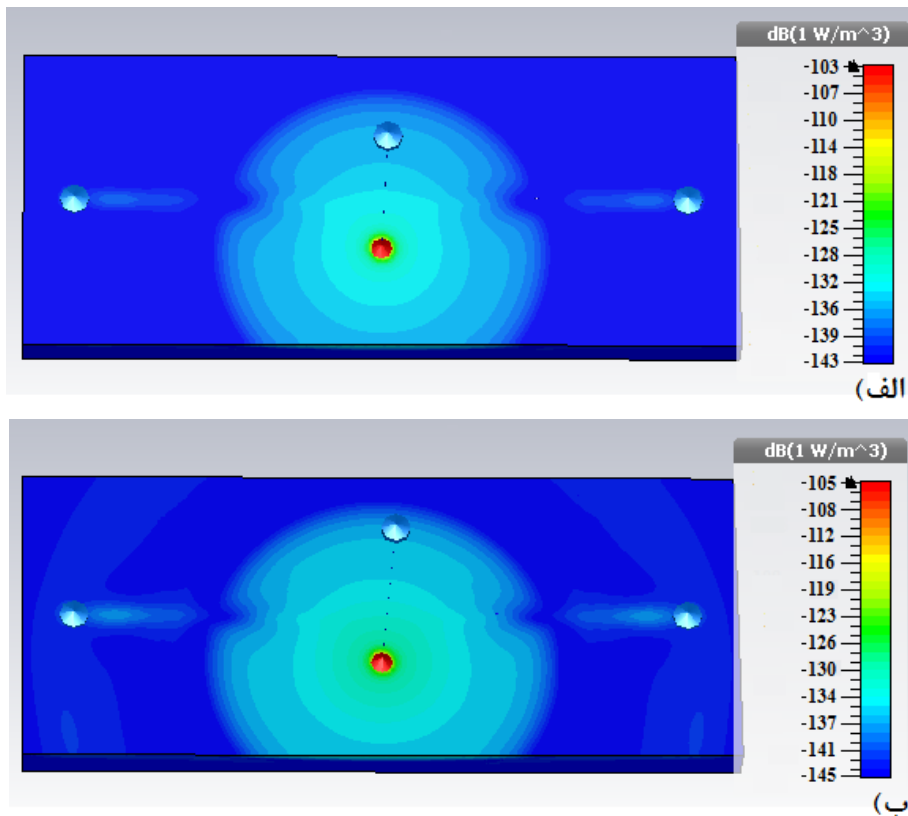
در شکل ۴-۱۰ می‌توان مشاهده نمود که برای $\sigma_g = 0/1 \text{ s/m}$ بیشترین مقدار چگالی تلفات توان زمین (ρ_p) به $-118 \text{ dB}(W/m^3)$ می‌رسد و در ارتفاع ۹/۹۸ متری (یعنی دقیقاً در زیر خط هوایی)

اندازه شدت میدان الکتریکی (E) در بیشترین مقدار خود به $-36 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ و اندازه شدت میدان مغناطیسی (H) به مقدار $-84 \text{ dB}(\text{A}/\text{m})$ می‌رسد. در این حالت مقدار ولتاژ القا شده در خط هوایی نیز برابر $48/75 \text{ kV}$ می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که برای $\sigma_g = 0/001 \text{ s/m}$ بیشترین مقدار چگالی تلفات توان زمین (ρ_p) به $-103 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^3)$ می‌رسد و در ارتفاع $9/98$ متری اندازه شدت میدان الکتریکی (E) در بیشترین مقدار خود به $-35 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ و اندازه شدت میدان مغناطیسی (H) به مقدار $-84 \text{ dB}(\text{A}/\text{m})$ می‌رسد. در این حالت مقدار ولتاژ القا شده در خط هوایی نیز برابر $75/16 \text{ kV}$ می‌باشد.

برای توجیه کردن متفاوت بودن مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در دو وضعیت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس با توجه به رابطه (۳-۲۸) می‌توان ادعا نمود که با افزایش فرکانس مقدار رسانایی الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش رسانایی الکتریکی زمین ضریب تلفات زمین نیز افزایش یافته و باعث تضعیف هرچه بیشتر امواج الکترومغناطیسی ناشی از جریان صاعقه خواهد شد. نتیجه تضعیف شدن امواج الکترومغناطیسی در زمین این می‌باشد که امواج الکترومغناطیسی با شدت کمتری به خط هوایی خواهند رسید در نتیجه ولتاژ کمتری در آن القای می‌شود. برای اثبات نمودن این ادعا برای $\sigma_{0g} = 0/001 \text{ s/m}$ در دو حالت رسانایی الکتریکی ثابت و رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس، مقدار چگالی تلفات توان در سطح زمین محاسبه شده که نتایج حاصل از آن در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

در شکل ۴-۱۲ می‌توان دید در حالتی که رسانایی الکتریکی زمین ثابت باشد مقدار چگالی تلفات توان در زمین به مقدار $-103 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^3)$ و در حالتی که رسانایی الکتریکی زمین متغیر با فرکانس باشد مقدار چگالی تلفات توان به مقدار $-105 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^3)$ می‌رسد.

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات می‌توان اینطور بیان نمود که با کاهش مقدار رسانایی الکتریکی زمین مقدار اضافه ولتاژ القا شده ناشی از صاعقه در خط هوایی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این می‌باشد که با کاهش مقدار رسانایی الکتریکی زمین مقدار تلفات زمین نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر زمین با رسانایی الکتریکی بزرگ‌تر محیطی با تلفات بیشتر برای امواج الکترومغناطیسی می‌باشد که در این حالت امواج الکترومغناطیسی با شدت کمتری به خط هوایی رسیده و در نتیجه ولتاژ کمتری در خط القا خواهد شد.



شکل (۴-۱۲) توزیع اندازه چگالی تلفات توان در سطح زمین
الف: رسانایی الکتریکی ثابت ب: رسانایی الکتریکی متغیر با فرکانس

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات مشاهده می‌شود که هر چه مقدار رسانایی الکتریکی فرکانس پایین زمین کوچک‌تر باشد میزان اثر گذاری وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر اگر مقدار رسانایی الکتریکی فرکانس پایین زمین مقدار بزرگی باشد تغییرات فرکانس و به تبع آن تغییرات رسانایی الکتریکی زمین تأثیر چندانی بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی نخواهد گذاشت.

۴-۵- جمع‌بندی

در مطالعات این فصل از پایان‌نامه ابتدا ساختار و نحوه شبیه‌سازی مسئله مورد نظر تشریح گردید و سپس با استفاده از رابطه‌ای برای مقدار گذردهی الکتریکی هوا (ϵ_r) تأثیر شرایط محیطی بر روی اضافه ولتاژ القایی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور بر اساس تغییرات سه پارامتر رطوبت

نسبی هوا، فشار هوا (ارتفاع از سطح دریا) و دمای هوا مقدار اضافه ولتاژ مورد محاسبه قرار گرفته و نتایج حاصل از آن تجزیه و تحلیل گردید. مشاهده شد که هر چه مقدار ϵ محیط بزرگتر باشد مقدار انرژی امواج رسیده به هادی خط هوایی کمتر شده و به دنبال آن مقدار اضافه ولتاژ القا شده در آن کوچکتر می‌گردد.

در ادامه این فصل با اتخاذ رابطه‌ای برای رسانایی الکتریکی زمین به صورت تابعی از فرکانس، مقدار و نحوه تأثیر گذاری وابسته بودن رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در شبکه‌های توزیع بررسی شده و نتایج حاصل از آن ارزیابی گردید. مشاهده گردید که با افزایش رسانایی الکتریکی زمین ضریب تلفات زمین نیز افزایش یافته و باعث تضعیف هرچه بیشتر امواج الکترومغناطیسی ناشی از جریان صاعقه خواهد شد. نتیجه تضعیف شدن امواج الکترومغناطیسی در زمین این می‌باشد که امواج الکترومغناطیسی با شدت کمتری به خط هوایی خواهند رسید در نتیجه ولتاژ کمتری در آن القامی شود.

۵- فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- جمع‌بندی

با توجه به مطالب بیان شده و بررسی نتایج مطالعات صورت گرفته در مقالات مختلف مشاهده می‌شود که مدل‌های جریان صاعقه معمولاً به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول مدل‌های جریان صاعقه با تابع نمایی دابل که معمولاً در رهیافت‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند و دسته دوم مدل‌های جریان صاعقه خطی و پله‌ای که معمولاً در رهیافت‌های تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در مقالات برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از ضربه غیرمستقیم صاعقه نیز دو رهیافت حل در حوزه زمان و حوزه فرکانس پیشنهاد شده است. با مقایسه این دو رهیافت با توجه به پیچیدگی حل در حوزه فرکانس و همچنین نتایج مناسب حاصل از حل در حوزه زمان، رهیافت محاسبه مستقیم و تحلیلی در حوزه زمان به عنوان رهیافت مناسب پیشنهاد می‌شود.

در حالت کلی روش‌های مختلف ارائه شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القا شده در اثر ضربه غیرمستقیم صاعقه بر روی خطوط هوایی شبکه توزیع به دو گروه روش‌های عددی و تحلیلی تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه معمولاً از تقریب‌هایی جهت حل مستقیم معادلات در حوزه زمان استفاده می‌کنند. در نتیجه جواب‌های حاصل از این روش‌ها نیز دقیق نمی‌باشند. روش‌های عددی معمولاً روش‌های مبتنی بر محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از برخورد ضربه صاعقه در حوزه فرکانس می‌باشند و از الگوریتم FDTD برای محاسبه اضافه ولتاژ القایی استفاده می‌نمایند. رویه‌های عددی نیازمند زمان محاسباتی بالا و حافظه زیاد جهت ذخیره سازی اطلاعات می‌باشند به طوری که روش‌های عددی کاملاً مبتنی بر نرم‌افزار می‌باشند. در پایان‌نامه حاضر برای شبیه‌سازی‌های مورد نظر از نرم‌افزار CST استفاده شده است که برای محاسبه ولتاژهای القایی از الگوریتم FDTD بهره می‌گیرد با این تفاوت که این نرم‌افزار میدان‌های الکترومغناطیسی را در حوزه زمان محاسبه می‌کند. این تفاوت ذکر شده یکی از ویژگی‌های بارز نرم‌افزار CST در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای مورد استفاده در این مبحث می‌باشد.

برای مدل کردن کانال صاعقه در کل چهار نوع مدل معرفی شده است. مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه نسبت به مدل‌های دیگر از دقت و اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد و در گذشته به

خاطر عدم در دسترس بودن ابزار مناسب برای حل مسائل مربوط به آن، مدل‌های دیگر به ویژه مدل مهندسی برای کانال صاعقه مورد استفاده قرار می‌گرفته است. عمده ایراد وارد شده به مدل مهندسی این می‌باشد که این مدل جنبه‌های فیزیکی که مربوط به ذات صاعقه هستند را در نظر نمی‌گیرد و تمرکز آنها بیشتر بر روی میدان‌های الکترومغناطیسی تولید شده بوسیله مدل و میدان‌های الکترومغناطیسی رسیده به نقطه مشاهده می‌باشد. مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه نسبت به سایر مدل‌ها جدیدتر بوده و برای مطالعات مربوط به صاعقه نتایج مربوط به این مدل نسبت به نتایج سایر مدل‌های کانال صاعقه دقیق‌تر می‌باشد. در این پایان‌نامه به منظور محاسبه و ارزیابی اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه (ضربات غیرمستقیم صاعقه) در خطوط هوایی شبکه‌های توزیع از مدل الکترومغناطیسی کانال صاعقه استفاده شده است.

نوآوری‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه، یکی ارزیابی تأثیر شرایط محیطی بر روی مقدار اضافه ولتاژ القا شده در خطوط هوایی و دیگری ارزیابی تأثیر وابستگی رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس بر روی اضافه ولتاژ القایی در خطوط هوایی می‌باشد که در هیچ یک از مطالعات انجام شده قبلی مرتبط با این بحث این دو موضوع در نظر گرفته نشده‌اند.

۵-۲- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه، می‌توان اهم نتایج حاصل از این پژوهش‌ها را به صورت زیر بیان نمود:

- با افزایش مقدار رطوبت نسبی هوا مقدار ϵ_r هوا افزایش یافته و به دنبال آن مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی کاهش می‌یابد.
- با افزایش ارتفاع محل نصب خط هوایی نسب به سطح آب‌های آزاد، فشار هوا در آن نقطه کاهش یافته و به دنبال آن مقدار ϵ_r هوا کاهش می‌یابد و در نتیجه با افزایش ارتفاع مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه در خط هوایی افزایش می‌یابد.
- با افزایش دمای هوا، مقدار ϵ_r هوا افزایش یافته و در نتیجه مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خط هوایی کاهش می‌یابد.

- زمین با مقدار رسانایی الکتریکی بزرگ‌تر، محیطی با تلفات بیشتر برای امواج الکترومغناطیسی می‌باشد.
- با کاهش مقدار رسانایی الکتریکی زمین مقدار تلفات زمین نیز کاهش می‌یابد که به تبع آن در این حالت امواج الکترومغناطیسی با شدت کمتری به خط هوایی رسیده و در نتیجه ولتاژ کمتری در خط القا خواهد شد.
- اگر مقدار رسانایی الکتریکی فرکانس پایین زمین مقدار بزرگی باشد تغییرات فرکانس و به تبع آن تغییرات رسانایی الکتریکی زمین تأثیر چندانی بر روی اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی نخواهد گذاشت.
- با کاهش مقدار رسانایی الکتریکی زمین، زمان پیشانی، زمان پشت و حداکثر دامنه موج اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه افزایش می‌یابد.

۵-۳- پیشنهادات

به منظور بهره‌برداری و همچنین ادامه کار پژوهشی حاضر و با توجه به نتایج حاصل از مستندات ارائه شده در این پایان‌نامه پیشنهاداتی به شرح ذیل جهت ادامه کار و بهره‌برداری عملیاتی از نتایج حاصل ارائه می‌گردد:

- از آنجا که زمین واقعی از چندین لایه متفاوت با مقدار رسانایی‌های الکتریکی مختلف تشکیل شده است، در محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه تأثیر چند لایه در نظر گرفتن زمین مورد بررسی قرار گیرد.
- در یک شبکه توزیع واقعی با اعمال پارامترهای بحث شده در این پایان‌نامه مقدار اضافه ولتاژ القایی صاعقه در خطوط هوایی محاسبه شده و با نتایج ثبت شده واقعی مقایسه شوند.
- در این پایان‌نامه نشان داده شده است که با در نظر گرفتن شرایط محیطی واقعی و وابسته بودن رسانایی الکتریکی زمین به فرکانس مقدار اضافه ولتاژ القا شده کمتر می‌شود، بنابراین لازم است هزینه وسایل حفاظتی به کار رفته در یک شبکه توزیع از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گیرند.

مراجع

- [1] V. A. Rakov and F. Rachidi, "Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 428-442, 2009.
- [2] M. Costea and B. Nicoara, "The effects of lightning induced overvoltages on low voltage power networks," *Conf. in PowerTechIEEE Bucharest*, 2009, pp. 1-6, 2009.
- [3] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Calculation of lightning-induced voltages on an overhead line taking into account the presence of nearby buildings," *7th Asia-Pacific International Conference on in Lightning (APL)*, pp. 833-839, 2011.
- [4] N. Rameli, M. Z. A. AbKadir, M. Izadi, C. Gomes, and J. Jasni, "Evaluation of lightning induced over-voltage due to variations of channel angle," *IEEE 7th International in Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp. 184-187, 2013.
- [5] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE Std 1410-2004*, p. 0_1.
- [6] A. Andreotti, D. Assante, F. Mottola, and L. Verolino, "An Exact Closed-Form Solution for Lightning-Induced Overvoltages Calculations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 1328-1343, 2009.
- [7] A. Borghetti, A. Morched, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Lightning-Induced Overvoltages Transferred Through Distribution Power Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 360-372, 2009.
- [8] م.ح.انصاری، "ارزیابی ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی خطوط هوایی شبکه توزیع"، پایان نامه کارشناس ارشد، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۸.
- [9] F. Mottola, "Methods and Techniques for the Evaluation of Lightning Induced Overvoltages on Power Lines. Application to MV Distribution System for Improving the Quality of Power Supply," *Doctoral Dissertation, Dep. of Electrical Engineering, Univ. Federico II, Napoli*, 2007.
- [10] T. Udo, "Estimation of lightning current wave front duration by the lightning performance of Japanese EHV transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 660-671, 1993.
- [11] A. De Conti, E. Perez, E. Soto, F.H. Silveira, S. Visacro, and H. Torres, "Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 3078-3084, 2010.
- [12] S. Rusck, "Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low-voltage networks," *Trans. Royal Inst. Technol.*, no. 120, pp. 1-118, Jan. 1958.

- [13] P. Chowdhuri, "Parametric effects on the induced voltages on overhead lines by lightning strokes to nearby ground," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1185-1194, 1989.
- [14] P. Chowdhuri, J. G. Anderson, W. A. Chisholm, T. E. Field, M. Ishii, J. A. Martinez, M. B. Marz, J. McDaniel, T. R. McDermott, A. M. Mousa, T. Narita, D. K. Nichols, and T. A. Short, "Parameters of lightning strokes: a review," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, pp. 346-358.
- [15] H. K. Hoidalén, "Analytical formulation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, pp. 92-100, 2003.
- [16] A. Ancajima, I. Baran, M. Costea, A. Carrus, E. Cinieri, G. Dragan, and C. Mazzetti, "Breakdown characteristics of MV distribution and electric traction lines insulators stressed by standard and short tail lightning impulses," *IEEE Russia in Power Tech*, pp. 1-7, 2005.
- [17] A. Andreotti, D. Assante, F. Mottola, and L. Verolino, "An Exact Closed-Form Solution for Lightning-Induced Overvoltages Calculations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, pp. 1328-1343, 2009.
- [18] A. Andreotti, A. Pierno, and V. A. Rakov, "An Analytical Approach to Calculation of Lightning Induced Voltages on Overhead Lines in Case of Lossy Ground-Part I: Model Development," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, pp. 1213-1223, 2013.
- [19] A. Shoory, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, and V. A. Rakov, "Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, pp. 1026-1027, 2005.
- [20] M. Rubinstein and M. A. Uman, "Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 31, pp. 183-189, 1989.
- [21] S. Rusck, "Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low-voltage networks," *Trans. Royal Inst. Technol.*, no. 120, pp. 1-118, Jan. 1958.
- [22] Y. Baba and V. A. Rakov, "Electromagnetic models of the lightning return stroke," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 112, pp. 1-17, 2007.
- [23] F. Mottola, "Modeling of Lightning-Induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program," *Doctoral Dissertation, Dep. of Electrical Engineering, Univ. Bologna, Bologna*, 2001.
- [24] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*, Artech House, 2000.
- [25] A. Taflove and K. R. Umashankar, "The Finite-Difference Time-Domain Method for Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Interactions," *Electromagnetics*, vol. 10, pp. 105-126, 1990.

- [26] A. Taflove and K. R. Umashankar, "The Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) Method for Electromagnetic Scattering and Interaction Problems," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 1, no.3, pp. 243-267, 1987.
- [27] M. Khosravi-Farsani, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, and F. Rachidi, "On the Validity of Approximate Formulas for the Evaluation of the Lightning Electromagnetic Fields in the Presence of a Lossy Ground," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, pp. 362-370, 2013.
- [28] W. E. Phillips, "The Permittivity of Air at a Wavelength of 10 Centimeters," *Proceedings of the IRE*, vol. 38, pp. 786-790, 1950.
- [29] Y. Li and P. Yang, "The Permittivity Based on Electromagnetic Wave Attenuation for Rain Medium and its Applications," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 20, pp. 2231-2238, 2006.
- [30] S. H. Gong and J. Y. Huang, "Accurate Analytical Model of Equivalent Dielectric Constant for Rain Medium," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 20, pp. 1775-1783, 2006.
- [31] L. H. Ford, "The Effect of Humidity on the Calibration of Precision Air Capacitors," *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering*, vol. 96, pp. 13-16, 1949.
- [32] I.M. Klotz and R.M. Rosenberg, *Chemical thermodynamics: Basic concepts and methods*. Hoboken, N.J: Wiley, 2008.
- [33] M. O. Alade, "Investigation of the Effect of Ground and Air Temperature on Very High Frequency Radio Signals," *Journal of Information Engineering and Applications*, vol.3, no.9, pp.16-22, 2013
- [34] M. Akbari, K. Sheshyekani, and M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems," *IEEE Trans. Electromagn.Compat.*, vol. 55, pp. 739-746. Aug. 2013.
- [35] S. Visacro, R. Alípio, M. H. Murta Vale, and C. Pereira, "The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity," *IEEE Trans. Electromagn.Compat.*, vol. 22, no. 2, pp. 401-406, May 2011.
- [36] J. C. Willett, J. C. Bailey, and E. P. Krider, "A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 94, pp. 16255-16267, 1989.
- [37] J. A. Laver and H. Griffiths, "The variability of soils in earthing measurements and earthing system performance", *Rev. Energ. Ren.Power Engineering*, School of Electrical Engineering, Cardiff University, UK, pp. 54-61, 2001.
- [38] R. J. Gustafson, R. Pursley, and V. D. Albertson, "Seasonal grounding resistance variations on distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, pp. 1013-1018, 1990.

- [39] S. Visacro and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- [40] P. Yutthagowith, A. Ametani, N. Nagaoka, and Y. Baba, "Lightning-Induced Voltage Over Lossy Ground by a Hybrid Electromagnetic Circuit Model Method With Cooray-Rubinstein Formula," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, pp. 975-985, 2009.
- [۴۱] م. خلیج امیرحسینی، مبانی انتشار امواج رادیویی، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۱.
- [42] A. De Conti, E. Perez, E. Soto, F. H. Silveira, S. Visacro, and H. Torres, "Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 3078-3084, 2010.
- [43] K. Nakada, H. Sugimoto, and S. Yokoyama, "Experimental facility for investigation of lightning performance of distribution lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 253-257, 2003.
- [۴۴] م. منفرد و گ. قره‌پتیان، "تاثیر استفاده از کابل بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه و نفوذ آن بر ترانسفورماتورهای توزیع"، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تهران، ایران، ۱۳۸۵.
- [45] R. K. Pokharel, M. Ishii, and Y. Baba, "Numerical electromagnetic analysis of lightning-induced voltage over ground of finite conductivity," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, pp. 651-656, 2003.
- [46] R. He-ming, Z. Bi-Hua, V. A. Rakov, S. Li-hua, G. Cheng, and Y. Jian-Hua, "Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines Using a 2-D FDTD Method and Agrawal Coupling Model," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, pp. 651-659, 2008.

Abstract:

Nowadays, in the field of the power system, the lightning activity is one of the main causes of a-periodic disturbances on distribution networks which seriously affect the reliability and power quality and in particular the so-called lightning indirect activity. Also scientific studies have been identified, that, due to the limited height of distribution lines of medium and low voltage distribution networks as compared to that of the structures in their vicinity indirect lightning return strokes are more frequent events than direct strokes, and for this reason we shall focus on such a type of lightning event. So that the scientific documents is stated that 90 percent of outages of overhead lines of distribution networks are caused by indirect lightning strokes.

Because this reasons, performance of overhead distribution lines under lightning conditions for optimal design and improve the performance of distribution networks shall be evaluated.

In this thesis first investigated the mechanism of occurrence of lightning and lightning return stroke concept has been expressed with regard to it. Then various models proposed for the lightning current is investigated. Also the two most widely used and accurate analytical method for the calculation of lightning induced voltages are presented, that used for lossless ground condition and lossy ground condition, respectively. In continuation of studies in this thesis first electromagnetic model of the lightning channel, which is the most accurate model for the lightning channel is described and using this model, the lightning induced overvoltage on overhead lines is calculated. In the final part of this thesis studies the impact of considering of environmental conditions and frequency dependent of electrical conductivity of the ground on lightning-induced voltages in overhead lines of distribution networks has been evaluated.

Keywords: Lightning indirect strikes - Electromagnetic models of lightning channel - Lightning induced overvoltage - Environmental conditions - Electrical conductivity of the ground



**Iran University of Science and Technology
Power Electric Engineering Department**

**Evaluation of Lightning Induced Over-Voltages in
Lines of Overhead Distribution Networks Using
Electromagnetic Models of Lightning channel**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirments for
the Degree of Master of Science in Power System Engineering**

**By:
Abdolghani Arekhi**

**Supervisor:
Dr. Ahmad Gholami**

August 2014