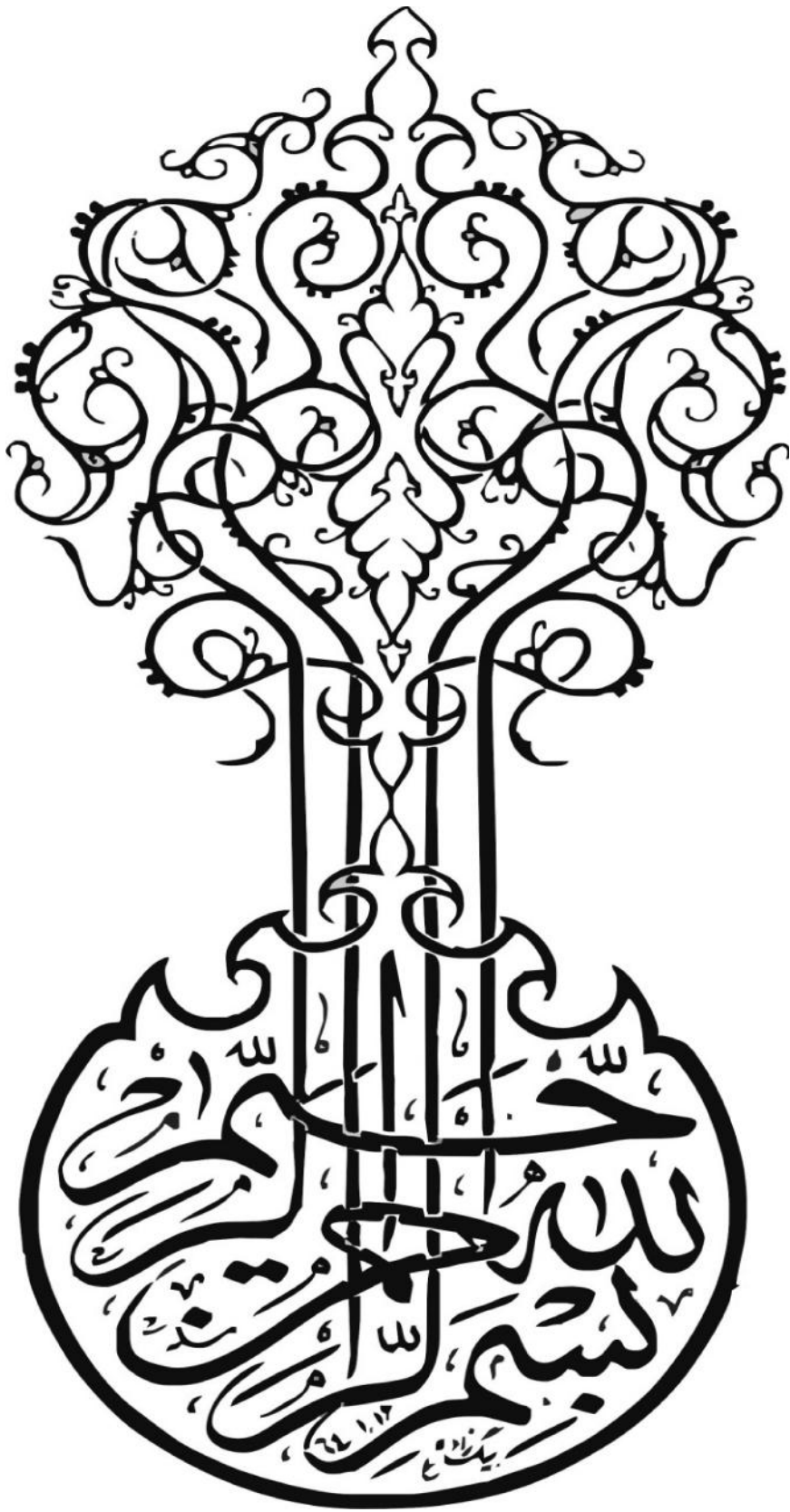


صفحه سفید



صفحه سفید



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی برق قدرت

عنوان:

بررسی اثر اشباع در ادوات مغناطیسی با استفاده از روش جریان های سطحی

نگارنده:

ناصر صابری جمال

استاد راهنما:

دکتر مهدی اره پناهی

بهمن ماه ۱۳۹۱

تصوير صورت جلسه

تقدیم به پدر و مادرم که همواره مشوق و امیدبخش من در انجام
این پایان نامه بودند.

این مجموعه پیشکشی است به پدر و مادر عزیز و بزرگوارم که از
تولد تا مرگم را مدیونشان هستم .

آنان که همراه زندگیم و شریک شادی‌ها و غم‌هایم بودند.

به آنانکه پندهایشان راهنمای انتخاب‌هایم و محبتشان امیدبخش
زندگیم است.

تقدیم به مادرم که گل هستی را به من هدیه کرد ، پدرم که شکوه
زندگی را به من بخشید.

شکر و سپاس بی پایان خویش را به درگاه حضرت حق نثار می‌دارم،
که توفیق انجام این پایان نامه را نصیبم گردانید و صبرم افزون ساخت
تا در تلاطم ایام، استوار بمانم.

به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای
ارزشمند و فرزانه ام، آقای دکتر مهدی اره پناهی که صبورانه
پشتیبان و راهنمای من بودند و در طول انجام این پروژه با
راهنمایی‌های مفید و مساعدت‌هایشان مسیر راه را هموار نمودند و
از هیچ‌گونه کمک علمی و عملی دریغ نکردند کمال تشکر و
قدردانی را داشته باشم.

همچنین از همکاری و راهنمایی‌های صمیمانه‌ی آقایان مهندس
رضا نامدار و مهندس ابراهیم حسام تشکر ویژه می‌نمایم.

چکیده

روش جریان سطحی (SCM) یکی از روش‌های حل عددی برای تحلیل و بررسی میدان‌های الکترومغناطیسی است که از مش‌های یک بعدی در تحلیل دو بعدی استفاده کرده و در مقایسه با روش اجزای محدود (FEM) دارای مش‌های کمتر است.

در این روش با استفاده از قانون بیوساوار در محاسبه پارامترهای میدان مغناطیسی، منابع جریان سطحی بین دو مرز با قابلیت نفوذپذیری مختلف، جایگزین مرزهای ماده مغناطیسی شده و تمام محیط به صورت هوا در نظر گرفته می‌شود. چگالی شار در هر نقطه برابر تاثیرات منابع و چگالی‌های جریان است و چون جریان‌های سطحی محاسبه شده اند، نیرو و گشتاور براحتی از روش نیروی لورنتز محاسبه می‌شوند.

در این پایان‌نامه به تشریح روش جریان‌های سطحی برای بدست آوردن میدان‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود. همچنین نحوه استفاده از این روش برای مواد فرومغناطیسی با رفتار غیرخطی تشریح شده است. از آنجا که برای استفاده از روش جریان‌های سطحی در حالت اشباع ادوات الکترومغناطیسی تاکنون از روش بهینه‌ای استفاده نشده است در این پایان‌نامه ابتدا به مطالعه و بررسی دقیق کارهای صورت گرفته در گذشته و روش‌های به کار گرفته شده در آن‌ها پرداخته می‌شود و مشکلات و محدودیت‌هایشان به صورت موشکافانه بررسی خواهد شد و از الگوریتم پیشنهادی برای بهبود روش جریان‌های سطحی در سیستم‌های الکترومغناطیسی غیرخطی استفاده شده است.

الگوریتم ارائه شده بر روی سیستم‌های مختلف الکترومغناطیسی با کمک نرم افزار متلب (MATLAB) شبیه سازی شده و با روش اجزای محدود توسط نرم افزار Maxwell مقایسه می‌شود. از نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه مشخص می‌شود که با استفاده از الگوریتم ارائه شده، می‌توان با حجم محاسبات کمتر به دقتی بهتر و مطلوب تر از روش‌های کلاسیک اعمال اثر اشباع در SCM دست یافت.

کلمات کلیدی: میدان مغناطیسی- جریان‌های سطحی- اشباع- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی.

عنوان	صفحه
۱) مقدمه	۱
۱-۱) روش های حل تحلیلی	۲
۱-۱-۱) جداسازی متغیرها	۲
۱-۱-۲) استفاده از دنباله ها و سری ها	۳
۱-۱-۳) روش نگاشت کنفورم	۳
۱-۲) روش های عددی	۴
۱-۲-۱) روش تفاضل محدود	۵
۱-۲-۲) روش المان های مرزی (BEM)	۶
۱-۲-۳) روش اجزای محدود	۶
۱-۲-۴) روش جریان های سطحی	۹
۱-۳) مروری بر تحقیقات در زمینه روش جریان سطحی	۱۰
۱-۴) توضیح کلی درباره فعالیت های صورت گرفته در این پایان نامه	۱۰
۱-۵) ساختار پایان نامه	۱۱
۲) اصول روش جریانهای سطحی	۱۳
۲-۱) مقدمه	۱۴
۲-۲) اصول کلی روش جریان های سطحی	۱۴
۲-۳) محاسبه چگالی جریان سطحی	۱۷
۲-۴) میدان های ناشی از منابع	۱۹
۲-۵) محاسبه نیرو و گشتاور	۲۳
۲-۶) عمومی سازی روش	۲۳
۲-۷) بهبود روند مش بندی	۲۴
۲-۸) شبیه سازی ترانسفورماتور تکفاز	۲۶
۲-۹) خلاصه فصل و نتیجه گیری	۳۰
۳) استفاده از روش جریان های سطحی برای تحلیل سیستم های غیر خطی	۳۱
۳-۱) مقدمه	۳۲
۳-۱-۱) معرفی روش های بکار گرفته شده	۳۲
۳-۱-۲) روش SCM-a	۳۲
۳-۱-۳) روش SCM-b	۳۳
۳-۲) شبیه سازی موتور رلوکتانسی	۳۶
۳-۳) خلاصه فصل و نتیجه گیری	۴۲

۴۳	الگوریتم پیشنهادی برای جایگذاری اتوماتیک نقاط انتخابی.....
۴۴	۱-۴) مقدمه
۴۴	۲-۴) تاثیر نقاط انتخابی بر نتایج مسائل
۴۶	۳-۴) تشریح الگوریتم پیشنهادی
۵۰	۵)ارائه و تحلیل نتایج شبیه سازی
۵۱	۱-۵)مقدمه
۵۱	۲-۵)تحلیل استاتیکی موتور خطی القایی یا اندوکسیونی.....
۵۱	۱-۲-۵)شبیه سازی استاتیکی موتور خطی
۵۳	۱-۱-۲-۵)حالت اشباع ضعیف
۵۹	۲-۱-۲-۵)تحلیل رفتار موتور خطی در حالت اشباع قوی
۶۴	۳-۵)تحلیل استاتیکی موتور سوئیچ شونده رلوکتانسی با در نظر گرفتن اثر اشباع.....
۶۵	۱-۳-۵)اصول اولیه موتور سوئیچ شونده رلوکتانسی
۶۵	۲-۳-۵)محاسبه گشتاور در شرایط اشباع
۶۵	۳-۳-۵)شبیه سازی استاتیکی موتور سوئیچ شونده رلوکتانسی در حالت اشباع
۶۸	۱-۳-۳-۵)تحلیل در حالت اشباع ضعیف
۷۴	۲-۳-۳-۵)حالت اشباع قوی
۷۹	۴-۵)خلاصه فصل و نتیجه گیری
۸۰	۶) نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۱	۱-۶) نتیجه گیری
۸۳	۷)منابع و مراجع

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) نمونه های شبکه بندی در روش تفاضل محدود: الف) شبکه مربعی، ب) شبکه دایروی.....	۶
شکل (۲-۱) تقسیم بندی محدوده میدان و خطوط هم پتانسیل در ترانسفورماتور تکفاز توسط روش اجزای محدود.....	۷
شکل (۳-۱) یک جزء مثلثی.....	۸
شکل (۴-۱) توزیع سطحی جریان.....	۹
شکل (۱-۲) محاسبه میدان مغناطیسی ناشی از جریان.....	۱۴
شکل (۲-۲) نحوه مدل کردن مرزهای مواد فرومغناطیسی با جریان های سطحی در SCM.....	۱۵
شکل (۳-۲) ماده مغناطیسی مش بندی شده با FEM.....	۱۵
شکل (۴-۲) جهت شماره گذاری مرزها در SCM.....	۱۶
شکل (۵-۲) مدل کردن مواد فرومغناطیس با استفاده از SCM.....	۱۶
شکل (۶-۲) منابع میدان و جریان های سطحی در مرز ناپیوستگی های مغناطیسی.....	۱۷
شکل (۷-۲) الف) منبع با سطح مقطع دایروی ب) منبع با سطح مقطع مستطیلی.....	۲۱
شکل (۸-۲) مواد با ضریب نفوذپذیری متفاوت بدون فصل مشترک ($n_{ob}=3, n_c=3$).....	۲۳
شکل (۹-۲) مواد با ضریب نفوذپذیری متفاوت بدون فصل مشترک ($n_{ob}=3, n_c=6$).....	۲۴
شکل (۱۰-۲) ساختار سیستم شبیه سازی شده (ابعاد بر حسب میلیمتر).....	۲۶
شکل (۱۱-۲) تقسیم بندی مرزها برای اعمال مش بندی.....	۲۷
شکل (۱۲-۲) مش بندی نهایی ترانسفورماتور تکفاز.....	۲۸
شکل (۱۳-۲) توزیع چگالی جریان های سطحی بر روی مرز های سیستم الکترومغناطیسی.....	۲۹
شکل (۱۴-۲) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM.....	۳۰
شکل (۱-۳) ناحیه تقسیم شده همراه با با نقاط انتخابی و فاصله آنها از مرز [۲۵].....	۳۴
شکل (۲-۳) موتور رلوکتانسی تکفاز شبیه سازی شده (ابعاد بر حسب میلیمتر).....	۳۶
شکل (۳-۳) منحنی استیل ۱۰۱۰.....	۳۷
شکل (۴-۳) تقسیم بندی نوع اول (مستطیلی) موتور رلوکتانسی برای استفاده از الگوریتم SCM-a و SCM-b.....	۳۸
شکل (۵-۳) تقسیم بندی نوع دوم (دو زنگه ای) موتور رلوکتانسی برای استفاده از الگوریتم SCM-a و SCM-b.....	۳۸
شکل (۶-۳) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت تقسیم بندی اول.....	۳۹
شکل (۷-۳) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت تقسیم بندی دوم.....	۴۰
شکل (۸-۳) نمودار چگالی شار در موتور رلوکتانسی.....	۴۰
شکل (۹-۳) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM.....	۴۱

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۴) الف: توزیع نقاط انتخابی برای اعمال اشباع ۴۵
- شکل (۲-۴) نیروی وارده بر قسمت متحرک ۴۵
- شکل (۳-۴) روند پیاده سازی جایگذاری اتوماتیک نقاط انتخابی ۴۹
- شکل (۱-۵) موتور شبیه سازی شده (اندازه ها بر حسب میلیمتر) ۵۱
- شکل (۲-۵) توزیع نقاط انتخابی اولیه برای اعمال اثر اشباع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ARSP ۵۲
- شکل (۳-۵) توزیع نقاط انتخابی برای اعمال اثر اشباع در حالت نقاط انتخابی ثابت و غیر اتوماتیک ۵۳
- شکل (۴-۵) نمودار چگالی شار موتور خطی در اشباع ضعیف ۵۴
- شکل (۵-۵) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM ۵۴
- شکل (۶-۵) توزیع نقاط انتخابی نقطه ۵۵
- شکل (۷-۵) چگالی شار عمودی در فاصله بین استاتور و روتور (SCM-a) ۵۶
- شکل (۸-۵) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور (SCM-b) ۵۷
- شکل (۹-۵) خطای محاسبه ضریب نفوذ پذیری بر حسب تعداد نقاط در SCM-a (ARSP) ۵۷
- شکل (۱۰-۵) نمودار تعداد نقاط انتخابی بر حسب گام تصحیح خطا ۵۸
- شکل (۱۱-۵) نیروی وارد بر روتور در اشباع ضعیف ۵۸
- شکل (۱۲-۵) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM ۵۹
- شکل (۱۳-۵) نمودار چگالی شار موتور خطی در حالت اشباع قوی ۶۰
- شکل (۱۴-۵) توزیع نقاط انتخابی توسط SCM-a-ARSP ۶۱
- شکل (۱۵-۵) توزیع نقاط انتخابی توسط SCM-b-ARSP ۶۱
- شکل (۱۶-۵) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین استاتور و روتور در حالت اشباع قوی (SCM-a) ۶۲
- شکل (۱۷-۵) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت اشباع قوی (SCM-b) ۶۲
- شکل (۱۸-۵) نمودار خطای نفوذ پذیری بر حسب تعداد نقاط انتخابی ۶۳
- شکل (۱۹-۵) نمودار افزایش نقاط انتخابی بر حسب تکرار-الف) (SCM-a (ARSP)-ب) (SCM-b (ARSP) ۶۳
- شکل (۲۰-۵) نمودار نیروی وارد بر روتور بر حسب تکرار ۶۴
- شکل (۲۱-۵) موتور شبیه سازی شده (ابعاد بر حسب میلیمتر) ۶۶
- شکل (۲۲-۵) توزیع نقاط انتخابی برای اعمال اثر اشباع در موتور سوئیچ شونده رلوکتانسی با روش کلاسیک ۶۷
- شکل (۲۳-۵) توزیع اولیه نقاط انتخابی برای اعمال اثر اشباع با جایگذاری اتوماتیک با ۵۹ نقطه ۶۷
- شکل (۲۴-۵) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM ۶۹
- شکل (۲۵-۵) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت اشباع ضعیف ۷۰
- شکل (۲۶-۵) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت اشباع ضعیف ۷۰

فهرست شکل ها

- شکل (۵-۲۷) توزیع نقاط انتخابی توسط روش جایگذاری اتوماتیک در حالت..... ۷۱
- شکل (۵-۲۸) نمودار خطای محاسبه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی..... ۷۲
- شکل (۵-۲۹) تعداد نقاط انتخابی بر حسب تعداد تکرار الف)-(SCM-a(ARSP)-ب)-(SCM-b(ARSP)..... ۷۳
- شکل (۵-۳۰) گشتاور وارد بر روتور در حالت اشباع ضعیف..... ۷۳
- شکل (۵-۳۱) نمودار توزیع شار توسط FEM و SCM-b(ARSP)..... ۷۵
- شکل (۵-۳۲) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت اشباع قوی (SCM-a)..... ۷۶
- شکل (۵-۳۳) چگالی شار عمودی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور در حالت اشباع قوی (SCM-b)..... ۷۶
- شکل (۵-۳۴) توزیع نقاط انتخابی روش جایگذاری اتوماتیک..... ۷۷
- شکل (۵-۳۵) نمودار خطای محاسبه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در SCM-a(ARSP)..... ۷۷
- شکل (۵-۳۶) تعداد نقاط انتخابی بر حسب تعداد تکرار-الف) (SCM-a(ARSP)-ب) (SCM-b(ARSP)..... ۷۸
- شکل (۵-۳۷) گشتاور وارد بر روتور در حالت اشباع قوی..... ۷۸

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۶.....	جدول (۱-۲) مشخصات ترانسفورماتور تکفاز
۲۸.....	جدول (۲-۲) بهبود یافتن مش بندی.....
۳۷.....	جدول (۱-۳) مشخصات موتور رلوکتانسی تکفاز
۴۸.....	جدول (۱-۴) ناحیه نمونه برای نمایش نحوه اضافه شدن نقاط انتخابی.....
۵۵.....	جدول (۲-۵) نتایج بدست آمده از شبیه سازی در حالت اشباع ضعیف.....
۶۰.....	جدول (۳-۵) نتایج بدست آمده از شبیه سازی در حالت اشباع قوی
۶۸.....	جدول (۵-۵) اطلاعات بدست آمده توسط روش های مختلف.....
۷۴.....	جدول (۶-۵) نتایج بدست آمده از شبیه سازی.....

فصل اول

(۱) مقدمه

۱-۱) روش های حل تحلیلی

دانشمندان و مهندسان از روش های گوناگونی برای حل مسائل میدان استفاده می کنند. این روش ها را می توان به روش های آزمایشی، روش های تحلیلی و روش های عددی دسته بندی کرد [۱]. روش های آزمایشی عملی دارای هزینه بالا، زمان بر، بعضی مواقع پرخطر و معمولاً دارای عدم انعطاف پذیری در تغییرات پارامترها است. روش های عددی نیز خود از روش های تحلیلی نشأت گرفته شده است. در واقع مسئله در نقطه ای توسط روش تحلیلی حل می شود و سپس از روش تکرار مسئله حل می شود.

در بیشتر موارد عملی با حل تحلیلی نمی توان مسائل میدان را حل کرد و باید به حل عددی روی آورد. حل تحلیلی در چک کردن نتایج بدست آمده از حل عددی مفید است. همچنین درک مسائل تنها با روش های عددی بدون داشتن دید اولیه از روش های تحلیلی سخت می باشد. در این قسمت روش های حل تحلیلی به طور خلاصه تشریح شده است. از جمله روش های تحلیلی می توان به روشهای:

- جداسازی متغیرها
- بسط های سری
- نگاشت کنفورم
- حل انتگرالی، تبدیل لاپلاس و فوریه

اشاره کرد [۱-۳].

۱-۱-۱) جداسازی متغیرها^۱

روش جداسازی متغیرها یک روش ساده برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی است [۱]. فرض کنید باید معادله موج یک بعدی

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1-1)$$

با شرایط مرزی زیر حل شود.

$$u(0,t) = u(l,t) = 0 \quad , t > 0 \quad (2-1)$$

^۱ separation of variables

$$u(x, 0) = f(x) \quad (3-1)$$

$$u_t(x, 0) = g(x) \quad (4-1)$$

مسئله پیدا کردن جوابی از معادله (۱-۱) است که در شرایط مرزی صدق کند برای این منظور نیز سه مرحله زیر را انجام می دهند:

- **مرحله اول:** با به کار بردن روش جدا کردن متغیرها، دو معادله دیفرانسیل معمولی بدست می آید.
- **مرحله دوم:** جواب هایی از دو معادله را که در شرایط مرزی (۲-۱) صدق می کنند را معین می کنند.
- **مرحله سوم:** جواب ها را طوری ترکیب می کنند که عبارت حاصل، جواب معادله (۱-۱) باشد و در شرایط اولیه (۳-۱) و (۴-۱) صدق کند.

۲-۱-۱ استفاده از دنباله ها و سری ها

یکی از روشهای حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده از دنباله ها و سری ها می باشد. این روش معمولاً برای معادلات دیفرانسیلی استفاده می شود که دارای متغیرهای مستقل تفکیک ناپذیر می باشند یا اگر تفکیک پذیر هستند در شرایط مرزی صدق نمی کنند.

۳-۱-۱ روش نگاشت کنفورم^۱ [۴]

یکی از شاهکارهای علم ریاضیات نگاشت کنفورم است. اگر چه فقط بعضی از مسائل میدان را حل می کند، ولی چون راه های زیاد دیگری وجود ندارد، اهمیت فوق العاده دارد. کنفورم را شاید بتوان هم شکل یا مشابه گفت. مقصود اینست که زاویه ها در شکل اصلی و نگاشت برابر هستند و این شرط لازم ولی غیر کافی برای شکل های مشابه است.

نگاشت کنفورم دارای شرایط و مشخصاتی است که در زیر ذکر می شود:

۱- نگاشت توسط یک تابع مختلط تحلیلی انجام می شود.

۲- تا تابع را حل نکرده ایم نمی دانیم مشخصات حدی میدان چیست. یعنی با داشتن منابع جریان نمی توان تابع را یافت؛ بلکه توابع را حل می کنند و متوجه می شوند مربوط به کدام منبع است.

۳- این روش فقط برای میدان های دو بعدی قابل استفاده است؛ یعنی میدانهایی که در جهت x و y تغییر می کنند ولی در جهت z ثابت هستند.

^۱ Conformal mapping.

۴- ظرفیت انرژی الکتریکی در نتیجه جریان، در شکل اصلی و در نگاشت یکی است و چون بدست آوردن مقادیر در نگاشت راحت تر است، پس اگر نگاشت را داشته باشیم می توانیم این مقادیر را بدست آوریم.

۵- در مواردی که مشتق تابع صفر است، نگاشت کنفورم نیست یعنی زاویه ها، در شکل اصلی و تصویر آن، مساوی نیستند.

علاوه بر موارد ذکر شده، در الکترومغناطیس از روش های تحلیلی می توان برای تعیین مدار معادل الکتریکی ماشین های الکتریکی استفاده کرد [۲۸].

۲-۱) روش های عددی

در بعضی از مسائل واقعی الکترومغناطیس نمی توان مسئله را از روش های تحلیلی حل کرد مثلاً اگر:

- معادله دیفرانسیل غیر خطی باشد و نتوان آن را خطی نمود.
- ناحیه حل مختلط باشد.
- شرایط مرزی از نوع ترکیبی باشد.
- محیط همگن و همسان نباشد.

که در این شرایط باید از روش های حل عددی استفاده کرد [۱، ۵-۷].

همانطور که کامپیوتر در اکثر موارد و برای محاسبات مختلف به کار می رود، برای پیدا کردن میدان ها نیز کاربرد داشته و مورد استفاده قرار می گیرد به طوری که امروزه بیشتر روش های دیگر را کنار زده است. پس موقعی که کامپیوتر در اختیار باشد و برنامه های مناسب وجود داشته باشد، از کامپیوتر استفاده می شود. تهیه برنامه متأسفانه خود مقدار زیادی وقت گیر است و نیاز به دقت دارد. در عوض به سادگی می توان تغییرات را وارد کرد و طراحی تجهیزات را با ظرافت انجام داد و بهینه نمود.

از نظر تئوری، روش های عددی مختلفی وجود دارند که هر یک ویژگی های خود را دارا می باشند. هدف حل معادلات دیفرانسیل هایی با شرایط مرزی خاص خود است. در ذیل چند نمونه از این روش ها به طور خلاصه تشریح شده است.

- روش تفاضل محدود (FDM)
- روش ممان (Moment Method)
- روش اجزای مرزی (BEM)