

# مدل سازی الکترومغناطیسی با استفاده از روش های اجزاء محدود

تألیف

جواو پدرو ای باستوس؛ نلسون سادوسکی

دانشگاه فدرال سانتا کاتارینا

فلوریانوپولیس، برزیل

ترجمه

دکتر احمد دارابی

مهندس حامد طحانیان

دانشگاه شاهرود

سرشناسه: باشتوش، ژوئان پدرو آسونپساو، ۱۹۵۲ - Bastos, João Pedro Assumpção

عنوان و نام پدیدآور: مدل سازی الکترومغناطیسی با استفاده از روش های اجزاء محدود/ تالیف جوآئو پدروای باستوس، نلسون سادوسکی؛ ترجمه احمد دارابی، حامد طحانیان.

مشخصات نشر: شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳.

مشخصات ظاهری: ۵۳۸ ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک: 978-600-7153-14-7

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

یادداشت: عنوان اصلی: Electromagnetic modeling by finite element methods, c2003.

یادداشت: کتابنامه: کتابنامه: ص. ۵۲۷-۵۳۸.

موضوع: الکترومغناطیس

موضوع: میدان های الکترومغناطیس

موضوع: روش المان های محدود

شناسه افزوده: سادوسکی، نلسون

شناسه افزوده: Sadowski, Nelson

شناسه افزوده: دارابی، احمد، ۱۳۴۳ - مترجم

شناسه افزوده: طحانیان، حامد، ۱۳۶۷ - مترجم

شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی شاهرود

رده بندی کنگره: ۱۳۹۳ ۴۵۴/ب۱۵۴۰/۴۷۶۰ QC

رده بندی دیویی: ۵۳۷

شماره کتابشناسی ملی: ۳۵۸۱۶۸۲



دانشگاه  
شاهرود

عنوان کتاب: مدل سازی الکترومغناطیسی با استفاده از روش های اجزاء محدود

تألیف: جوآئو پدرو ای باستوس؛ نلسون سادوسکی

ترجمه: دکتر احمد دارابی و مهندس حامد طحانیان

نوبت و سال چاپ: چاپ اول، ۱۳۹۳

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

ویراستار علمی: دکتر حسین مروی

ویراستار ادبی: دکتر نوید فیروزی

طرح جلد: عطاء... خلج

چاپ و صحافی: دانشگاه صنعتی شاهرود

قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان

محل نشر و نشانی انتشارات: شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه شاهرود (صندوق پستی: ۳۱۶، کد پستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱، تلفن:

۰۲۳-۳۳۳۹۶۲۲۰)

## فهرست مطالب

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| پیشگفتار مؤلفان.....                       | ز  |
| پیشگفتار مترجمان.....                      | ض  |
| فصل ۱: مقدمات ریاضی.....                   | ۱  |
| ۱-۱- مقدمه.....                            | ۱  |
| ۲-۱- نشانه گذاری بردار.....                | ۲  |
| ۳-۱- مشتق برداری.....                      | ۲  |
| ۱-۳-۱- عملگر نابلا (∇).....                | ۲  |
| ۲-۳-۱- تعریف گرادیان، دیورژانس و چرخش..... | ۳  |
| ۴-۱- گرادیان.....                          | ۵  |
| ۱-۴-۱- مثالی از گرادیان.....               | ۷  |
| ۵-۱- دیورژانس.....                         | ۸  |
| ۱-۵-۱- تعریف شار.....                      | ۸  |
| ۲-۵-۱- قضیه دیورژانس.....                  | ۱۰ |
| ۳-۵-۱- شار ابقایی (پایستار).....           | ۱۲ |
| ۴-۵-۱- مثال هایی از دیورژانس.....          | ۱۴ |
| ۶-۱- چرخش.....                             | ۱۶ |
| ۱-۶-۱- گردش یک بردار.....                  | ۱۶ |
| ۲-۶-۱- قضیه استوکس.....                    | ۱۹ |
| ۳-۶-۱- مثالی از چرخش.....                  | ۲۲ |

|    |                                                                  |
|----|------------------------------------------------------------------|
| ۲۳ | ۷-۱- عمل گرهای مرتبه دوم.....                                    |
| ۲۵ | ۸-۱- به کارگیری عمل گرها در بیش از یک تابع.....                  |
| ۲۶ | ۹-۱- عبارات در مختصات استوانه‌ای و کروی.....                     |
|    | فصل ۲: معادلات ماکسول، میدان های الکتریسیته ساکن، مغناطیس ساکن،  |
| ۲۹ | مغناطیس دینامیک.....                                             |
| ۲۹ | ۱-۲- مقدمه.....                                                  |
| ۳۱ | ۲-۲- کمیت های الکترومغناطیس.....                                 |
| ۳۳ | ۱-۲-۲- شدت میدان الکتریکی $E$ .....                              |
| ۳۳ | ۲-۲-۲- شدت میدان مغناطیسی $H$ .....                              |
| ۳۴ | ۳-۲-۲- چگالی شار مغناطیسی $B$ و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu$ .....   |
| ۳۶ | ۴-۲-۲- چگالی شار الکتریکی $D$ و گذردهی الکتریکی $\epsilon$ ..... |
| ۳۶ | ۵-۲-۲- چگالی جریان سطحی $J$ .....                                |
| ۳۷ | ۶-۲-۲- چگالی بار حجمی $\rho$ .....                               |
| ۳۷ | ۷-۲-۲- هدایت الکتریکی $\sigma$ .....                             |
| ۳۹ | ۳-۲- فرم محلی (نقطه‌ای) معادلات.....                             |
| ۴۴ | ۴-۲- ناهمسان گردی.....                                           |
| ۴۷ | ۵-۲- تقریب معادلات ماکسول.....                                   |
| ۵۳ | ۶-۲- فرم انتگرالی معادله ماکسول.....                             |
| ۵۵ | ۷-۲- میدان های الکترواستاتیکی.....                               |
| ۵۶ | ۱-۷-۲- بار الکتریکی.....                                         |
| ۶۲ | ۲-۷-۲- میدان های ناپایستار: نیروی محرکه الکتریکی.....            |

|     |                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| ۶۵  | ۲-۷-۳- شکست (انکسار) میدان الکتریکی                                        |
| ۷۰  | ۲-۷-۴- استقامت دی الکتریک                                                  |
| ۷۳  | ۲-۷-۵- معادلات لاپلاس و پواسن مربوط به میدان الکتریکی برای محیط دی الکتریک |
| ۷۶  | ۲-۷-۶- معادلات لاپلاس مربوط به میدان الکتریکی برای محیط رسانا              |
| ۷۶  | ۲-۸-۸- میدان های مغناطیسی ساکن                                             |
| ۷۸  | ۲-۸-۱- معادلات ماکسول در مغناطیس ساکن                                      |
| ۸۲  | ۲-۸-۲- قانون بیوساوار                                                      |
| ۸۵  | ۲-۸-۳- شکست (انکسار) میدان مغناطیسی                                        |
| ۸۸  | ۲-۸-۴- انرژی در میدان های مغناطیسی                                         |
| ۹۱  | ۲-۸-۵- مواد مغناطیسی                                                       |
| ۱۱۴ | ۲-۸-۶- اندوکتانس خودی و اندوکتانس متقابل                                   |
| ۱۱۸ | ۲-۹-۹- میدان های مغناطیسی دینامیک                                          |
| ۱۱۹ | ۲-۹-۱- معادلات ماکسول برای میدان مغناطیسی دینامیک                          |
| ۱۲۴ | ۲-۹-۲- نفوذ میدان های وابسته به زمان در مواد رسانا                         |
| ۱۳۳ | فصل ۳: معرفی مختصر روش اجزاء محدود                                         |
| ۱۳۳ | ۳-۱- مقدمه                                                                 |
| ۱۳۵ | ۳-۲- روش گالرکین- مفاهیم پایه                                              |
| ۱۳۵ | ۳-۲-۱- تشکیل معادلات فیزیکی                                                |
| ۱۳۵ | ۳-۲-۲- مثلث مرتبه اول                                                      |
| ۱۳۸ | ۳-۲-۳- کاربرد روش مانده وزنی                                               |

- ۴-۲-۳- کاربرد روش اجزاء محدود و حل ..... ۱۴۲
- ۵-۲-۳- شرایط مرزی ..... ۱۴۵
- ۳-۳- یک برنامه اجزاء محدود مرتبه اول ..... ۱۴۶
- ۱-۳-۳- مثالی از کاربرد برنامه اجزاء محدود ..... ۱۵۲
- ۴-۳- تعمیم روش اجزاء محدود ..... ۱۵۸
- ۱-۴-۳- اجزاء محدود مرتبه بالا : کلیات ..... ۱۶۰
- ۲-۴-۳- اجزاء محدود مرتبه بالا: علائم ..... ۱۶۲
- ۳-۴-۳- اجزاء محدود مرتبه بالا: پیاده‌سازی ..... ۱۶۶
- ۴-۴-۳- پیوستگی اجزاء محدود ..... ۱۶۹
- ۵-۴-۳- پایه چند جمله‌ای ..... ۱۷۰
- ۶-۴-۳- تبدیل کمیت‌ها- ژاکوبین ..... ۱۷۲
- ۷-۴-۳- محاسبه انتگرال‌ها ..... ۱۷۴
- ۵-۳- انتگرال گیری عددی ..... ۱۷۹
- ۶-۳- برخی اجزاء محدود دوبعدی ..... ۱۸۳
- ۱-۶-۳- جزء مثلثی مرتبه اول ..... ۱۸۵
- ۲-۶-۳- جزء مثلثی مرتبه دوم ..... ۱۸۶
- ۳-۶-۳- جزء دوخطی چهارضلعی ..... ۱۸۷
- ۴-۶-۳- جزء درجه دوم چهارضلعی ..... ۱۸۸
- ۷-۳- تزویج اجزاء محدود متفاوت ..... ۱۹۰
- ۱-۷-۳- تزویج انواع مختلف اجزاء محدود ..... ۱۹۰
- ۸-۳- محاسبه چند جمله در معادله میدان ..... ۱۹۲

- ۱۹۲..... ۱-۸-۳- ماتریس سختی
- ۱۹۴..... ۲-۸-۳- محاسبه جمله دوم در معادله (۷۲-۳)
- ۱۹۵..... ۳-۸-۳- محاسبه جمله سوم در معادله (۷۲-۳)
- ۱۹۶..... ۴-۸-۳- محاسبه جمله منبع
- ۱۹۶..... ۹-۳- یک برنامه اجزاء محدود مرتبه دوم دوبعدی ساده شده
- ۱۹۶..... ۱-۹-۳- مسأله‌ای که باید حل شود
- ۱۹۹..... ۲-۹-۳- ناحیه گسسته‌سازی شده
- ۲۰۰..... ۳-۹-۳- برنامه اجزاء محدود

#### فصل ۴: روش اجزاء محدود اعمال شده بر مسائل الکترومغناطیس دوبعدی

- ۲۱۵.....
- ۲۱۵..... ۱-۴- مقدمه
- ۲۱۶..... ۲-۴- برخی مسائل استاتیکی
- ۲۱۶..... ۱-۲-۴- میدان‌های الکترواستاتیکی: مواد دی‌الکتریک
- ۲۱۹..... ۲-۲-۴- جریان‌های ثابت: مواد هادی
- ۲۲۰..... ۳-۲-۴- میدان‌های مغناطیسی: پتانسیل اسکالر
- ۲۲۲..... ۴-۲-۴- میدان مغناطیسی: پتانسیل برداری
- ۲۳۲..... ۵-۲-۴- پتانسیل برداری الکتریکی
- ۲۳۳..... ۳-۴- کاربرد در مسائل جریان گردابی دوبعدی
- ۲۳۴..... ۱-۳-۴- جزء مرتبه اول در دستگاه مختصات محلی
- ۲۳۹..... ۲-۳-۴- معادلات پتانسیل برداری با استفاده از گسسته‌سازی زمانی
- ۲۴۸..... ۳-۳-۴- معادله پتانسیل برداری مختلط

- ۴-۳-۴- ساختارها با بخش‌های متحرک ..... ۲۵۲
- ۴-۴- کاربردهای تقارن محوری ..... ۲۵۵
- ۴-۴-۱- فرمول‌بندی تقارن محوری برای پتانسیل برداری ..... ۲۵۸
- ۴-۵- مزایا و محدودیت‌های فرمول‌سازی‌های دوبعدی ..... ۲۶۲
- ۴-۶- کاربردهای غیرخطی ..... ۲۶۵
- ۴-۶-۱- روش تخمین مکرر ..... ۲۶۵
- ۴-۶-۲- روش نیوتن-رافسون ..... ۲۶۶
- ۴-۷- تکرار هندسی حوزه‌ها ..... ۲۷۳
- ۴-۷-۱- شکل‌های متناوب ..... ۲۷۳
- ۴-۷-۲- شکل‌های نامتناوب ..... ۲۷۵
- ۴-۸- تحلیل مسائل حرارتی ..... ۲۷۵
- ۴-۸-۱- رسانش حرارتی ..... ۲۷۶
- ۴-۸-۲- انتقال همرفت ..... ۲۷۶
- ۴-۸-۳- تابش ..... ۲۷۷
- ۴-۸-۴- پیاده‌سازی FE ..... ۲۷۸
- ۴-۹- دستگاه الکترومغناطیسی تغذیه‌شده با ولتاژ ..... ۲۸۰
- ۴-۱۰- مثال‌های استاتیک ..... ۲۸۵
- ۴-۱۰-۱- محاسبه میدان‌های الکتریکی ساکن ..... ۲۸۶
- ۴-۱۰-۲- محاسبه جریان‌های استاتیک ..... ۲۸۷
- ۴-۱۰-۳- محاسبه میدان مغناطیسی - پتانسیل عددی ..... ۲۹۱
- ۴-۱۰-۴- محاسبه میدان مغناطیسی - پتانسیل برداری ..... ۲۹۳

|          |                                                                          |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| ۲۹۷..... | ۱۱-۴- مثال‌های دینامیک.....                                              |
| ۲۹۷..... | ۱-۱۱-۴- جریان‌های گردابی: گسسته‌سازیِ زمان.....                          |
| ۳۰۱..... | ۲-۱۱-۴- قطعه هادی متحرک در مقابل الکترومگنت.....                         |
| ۳۰۵..... | ۳-۱۱-۴- شبیه‌سازی پاسخ پله یک دستگاه تغذیه‌شده با ولتاژ.....             |
| ۳۰۹..... | ۴-۱۱-۴- مثال حرارتی: گرمای حاصل از جریان ادی.....                        |
| ۳۱۳..... | <b>فصل ۵: تزویج معادلات میدان و مدار الکتریکی.....</b>                   |
| ۳۱۳..... | ۱-۵- مقدمه.....                                                          |
| ۳۱۴..... | ۲-۵- معادلات الکترومغناطیسی.....                                         |
| ۳۱۴..... | ۱-۲-۵- فرمول‌بندی با استفاده از پتانسیل برداری مغناطیسی.....             |
| ۳۱۵..... | ۲-۲-۵- فرمول‌بندی در دو بعد.....                                         |
| ۳۱۶..... | ۳-۲-۵- معادلات برای هادی‌ها.....                                         |
| ۳۲۰..... | ۴-۲-۵- معادلات برای کل حوزه.....                                         |
| ۳۲۱..... | ۵-۲-۵- روش اجزاء محدود.....                                              |
| ۳۲۳..... | ۳-۵- معادلات برای پیکربندی‌های متفاوت هادی.....                          |
| ۳۲۳..... | ۱-۳-۵- اتصالات هادی‌های ضخیم.....                                        |
| ۳۲۳..... | ۲-۳-۵- اتصالات هادی‌های نازک.....                                        |
| ۳۳۶..... | ۴-۵- اتصالات میان تجهیزات الکترومغناطیسی و مدارات تغذیه‌کننده خارجی..... |
| ۳۳۶..... | ۱-۴-۵- معادلات کاهش یافته تجهیزات الکترومغناطیسی.....                    |
| ۳۳۷..... | ۲-۴-۵- معادلات مدار تغذیه‌کننده و ارتباط آن‌ها با معادلات میدان.....     |
| ۳۳۸..... | ۳-۴-۵- محاسبه ماتریس‌های $G_1$ تا $G_6$ .....                            |
| ۳۶۵..... | ۴-۴-۵- گسسته‌سازی مشتق زمانی.....                                        |

|     |                                                                              |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|
| ۳۶۹ | ۵-۵- مثال‌ها.....                                                            |
| ۳۶۹ | ۵-۵-۱- شبیه‌سازی‌ها با شکل موج‌های ولتاژ معلوم.....                          |
| ۳۷۶ | ۵-۵-۲- مدل‌سازی یک دستگاه الکترومغناطیسی تغذیه‌شده با مبدل ساکن.....         |
| ۳۸۱ | <b>فصل ۶: مدل‌سازی حرکت برای ماشین‌های الکتریکی.....</b>                     |
| ۳۸۱ | ۶-۱- مقدمه.....                                                              |
| ۳۸۲ | ۶-۱-۱- روش‌های با فاصله‌های هوایی غیرگسسته‌سازی‌شده.....                     |
| ۳۸۲ | ۶-۱-۲- روش‌های با فاصله هوایی گسسته‌سازی‌شده.....                            |
| ۳۸۳ | ۶-۲- عنصر کلان.....                                                          |
| ۳۸۸ | ۶-۳- باند متحرک.....                                                         |
| ۳۹۳ | ۶-۴- اثر مورب بودن در ماشین‌های الکتریکی با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی..... |
| ۴۰۳ | ۶-۵- مثال‌ها.....                                                            |
| ۴۰۳ | ۶-۵-۱- موتور القایی سه‌فاز.....                                              |
| ۴۰۴ | ۶-۵-۲- موتور مغناطیس دائم.....                                               |
| ۴۱۱ | <b>فصل ۷: اثر متقابل بین نیروهای الکترومغناطیسی و مکانیکی.....</b>           |
| ۴۱۱ | ۷-۱- مقدمه.....                                                              |
| ۴۱۳ | ۷-۲- روش‌های مبتنی بر فرمول‌بندی‌های مستقیم.....                             |
| ۴۱۳ | ۷-۲-۱- روش تغییرات کوانترژی مغناطیسی.....                                    |
| ۴۱۴ | ۷-۲-۲- روش تنسور تنش ماکسول.....                                             |
| ۴۲۷ | ۷-۲-۳- روش پیشنهادی آرکیو.....                                               |
| ۴۲۹ | ۷-۲-۴- روش مشتق‌گیری ماتریس ژاکوبین محلی.....                                |
| ۴۳۱ | ۷-۲-۵- مثال‌هایی از محاسبه گشتاور.....                                       |

- ۴۳۴ ..... ۳-۷- روش‌های بر پایهٔ چگالی نیرو.
- ۴۳۴ ..... ۱-۳-۷- ملاحظات اولیه.
- ۴۳۷ ..... ۲-۳-۷- فرمول‌بندی‌های منابع معادل.
- ۴۴۰ ..... ۳-۳-۷- فرمول‌بندی بر پایهٔ مشتق انرژی.
- ۴۴۴ ..... ۴-۳-۷- مقایسه بین روش‌های مختلف.
- ۴۴۸ ..... ۴-۷- ارتعاشات ماشین‌های الکتریکی به وجود آمده توسط نیروهای مغناطیسی.
- ۴۴۹ ..... ۱-۴-۷- محاسبهٔ نیروی مغناطیسی.
- ۴۴۹ ..... ۲-۴-۷- محاسبات مکانیکی.
- ۴۵۴ ..... ۳-۴-۷- نمونه‌ای از محاسبهٔ ارتعاش.
- ۴۶۱ ..... ۵-۷- مثالی از تزویج بین معادلات میدان و مدار، به همراه گذرایی‌های مکانیکی.
- ۴۶۹ ..... **فصل ۸: تلفات آهنی**
- ۴۶۹ ..... ۱-۸- مقدمه.
- ۴۷۰ ..... ۲-۸- تلفات جریان گردابی.
- ۴۷۴ ..... ۳-۸- هیستریزیس.
- ۴۸۲ ..... ۴-۸- تلفات غیرعادی یا اضافی.
- ۴۸۵ ..... ۵-۸- تلفات آهن کل.
- ۴۸۸ ..... ۱-۵-۸- مثال.
- ۴۹۰ ..... ۶-۸- روش جیلز-اثرتون.
- ۴۹۰ ..... ۱-۶-۸- معادلات JA.
- ۴۹۴ ..... ۲-۶-۸- فرآیند پیاده‌سازی عددی مدل JA.
- ۴۹۵ ..... ۳-۶-۸- مثال‌هایی از حلقه‌های هیستریزیس حاصل از روش JA.

- ۵۰۰..... ۸-۶-۴- به دست آوردن پارامترها از حلقه‌های پسماند تجربی.
- ۵۰۵..... ۸-۷- مدل جلیز-اثر تون معکوس.
- ۵۰۵..... ۸-۷-۱- روش JA معکوس.
- ۵۰۸..... ۸-۷-۲- فرآیند پیاده‌سازی عددی روش JA معکوس.
- ۵۰۹..... ۸-۸- در نظر گرفتن تلفات آهن در محاسبات اجزاء محدود.
- ۵۱۱..... ۸-۸-۱- مدل سازی هیستریزیس با استفاده از جمله مغناطیس‌شوندگی M.
- ۵۱۳..... ۸-۸-۲- مدل سازی هیستریزیس به وسیله مقاومت ویژه مغناطیسی دیفرانسیلی.
- ۵۱۷..... ۸-۸-۳- وارد کردن تلفات جریان گردابی در مدل سازی اجزاء محدود.
- ۵۱۹..... ۸-۸-۴- وارد کردن تلفات غیر معمول در مدل سازی اجزاء محدود.
- ۵۲۱..... ۸-۸-۵- مثال‌هایی از اعمال تلفات آهن بر محاسبات FE.
- ۵۲۷..... کتاب‌شناسی.

کتاب پیش رو درباره تحلیل الکترومغناطیسی (EM)<sup>۱</sup> بر اساس معادلات ماکسول و کاربرد روش اجزاء محدود (FEM)<sup>۲</sup> در تحلیل تجهیزات الکترومغناطیسی فرکانس پایین نوشته شده است. دانشجویانی که به تازگی وارد این حوزه شده‌اند، در این کتاب یک روش آموزشی مناسب برای نخستین برخورد با FEM خواهند یافت که شامل چندین برنامه کامپیوتری و تعداد زیادی مثال است. از طرف دیگر، این کتاب برای اساتید و پژوهشگرانی که در این حوزه تجربه دارند، موضوعات و مباحث پیشرفته‌ای برای استفاده در تحقیقات کاری و کلاس‌های درس، ارائه می‌کند.

تمرکز این کتاب بر سه موضوع مکمل یکدیگر است. قسمت نخست مربوط به بیان آموزش گونه معادلات EM و به کارگیری FEM در مسائل کلاسیک الکترومغناطیس است. موضوع دوم درباره تزویج معادلات EM با سایر پدیده‌ها مانند مدارهای خارجی (الکتریکی و الکترونیکی)، حرکت و معادلات مکانیکی، تحلیل لرزش، گرم شدن، جریان‌های ادی و غیرخطی‌هایی است که در ساختارهای الکترومغناطیسی وجود دارند. بحث پایانی به تحلیل تلفات الکتریکی و مغناطیسی، شامل تلفات هیستریزس، تلفات جریان ادی و تلفات بی‌قاعده یا غیر عادی اختصاص یافته است.

مخاطب اصلی این کتاب دانشجویان تحصیلات تکمیلی هستند اما نکته‌ای که باید به آن اشاره نمود این است که تعداد دانشجویان کارشناسی‌ای که با این حوزه آشنا می‌شوند، در حال افزایش است و به همین دلیل تلاشی زیادی صورت گرفته است تا در بیان موضوعات ارائه‌شده در این کتاب، از یک رویکرد کاملاً آموزشی استفاده شود.

تزویج و تلفات، که مباحث پیشرفته کتاب هستند، موضوعات بخشی عظیمی از تحقیقات علمی در دو دهه اخیر بوده‌اند و تعداد بسیاری از مقالات فنی مرتبط با این موضوعات در مجلات و کنفرانس‌ها منتشر شده‌اند. با وجود این که تحقیقات درباره این موضوعات همچنان ادامه دارد، مطالبی که ما انتخاب کرده‌ایم بر-اساس روش‌ها و تکنیک‌های اثبات‌شده هستند. این مطالب بدون محدودیت‌های کلی و عمومی قابل استفاده هستند.

کتاب حاضر شامل فصل‌های زیر است:

- فصل ۱: فصلی کوتاه درباره "مقدمت ریاضی" با هدف یادآوری برخی از روابط جبری مهم مورد-نیاز در فصل‌های بعدی و همچنین آشنایی با زبان ریاضی و نحوه علامت‌گذاری مورد استفاده در ادامه کتاب، ارائه می‌شود.

<sup>۱</sup> Electromagnetic

<sup>۲</sup> Finite Element Method

- فصل ۲: معادلات ماکسول توصیف می‌شوند تا پشتوانهٔ تئوری برای فصل‌های بعدی فراهم شود. به‌صورت کلاسیک، به‌کارگیری FEM در مکانیک متداول‌تر است و به نظر ما مرور کوتاه EM در این فصل مناسب است.
- فصل ۳: این فصل به معرفی FEM اختصاص یافته است و در آن مطرح کردن روش به اختصار مورد نظر است. به عبارت دیگر، بررسی این روش به‌صورت بسیار عمیق مدّ نظر نیست (کتاب‌های متعددی برای این منظور در دسترس هستند) بلکه هدف این فصل بیان مهم‌ترین جنبه‌های FEM برای تحلیل EM است. در این فصل موجز و مختصر، تمامی مفاهیم اساسی FE معرفی می‌شوند و نحوهٔ ایجاد ارتباط بین آن‌ها برای به‌کارگیری در یک برنامهٔ محاسباتی به‌صورت واضح نشان داده می‌شود.
- فصل ۴: پس از ارائهٔ FEM، با اعمال این روش بر معادلات EM، مفاهیم فیزیکی آن‌ها بیان می‌گردد و نکات ویژهٔ مربوط به این حوزه به‌صورت کامل توضیح داده می‌شوند. معادلات حرارتی نیز در این فصل گنجانده شده‌اند.
- فصل ۵: اکنون ترویج با مدارهای الکتریکی و الکترونیکی ارائه می‌شود. در این فصل بسیاری از تجربیات و کارهای تحقیقاتی پیشرفتهٔ ما به‌صورت مفصل بیان می‌شوند. فرمول‌بندی ارائه‌شده به گونه‌ای است که پدیده‌های پیشرفته، نظیر اتصال تجهیزات EM به مبدل‌هایی که توپولوژی آن‌ها قبل از اتصال ناشناخته است را نیز شامل می‌شود. این بدان معنی است که رفتار دینامیکی مبدل (با منظور کردن سوئیچینگ ترستورها، دیودها و...) در حین کار در نظر گرفته می‌شود و به‌صورت هم‌زمان با معادلات EM محاسبه می‌شود. هم‌چنین، پدیدهٔ جریان ادی در هادی‌های "ضخیم" مورد بررسی می‌شوند.
- فصل ۶: حرکت یکی از جنبه‌های مهم تجهیزات EM است؛ اکثر این تجهیزات (ماشین‌های الکتریکی، قطع و وصل کننده‌ها<sup>۱</sup> و عمل‌گرها<sup>۲</sup>) در معرض نیروهای مکانیکی هستند و حرکت می‌کنند. در این فصل، روش‌هایی برای گسسته‌سازی فاصله‌های هوایی و شبیه‌سازی جابه‌جایی فیزیکی ارائه می‌شود. در بخش پایانی این فصل یک روش (براساس شبیه‌سازی‌های دوبعدی) برای در نظر گرفتن تأثیر اریب بودن<sup>۳</sup> در ماشین‌های الکتریکی ارائه می‌شود.
- فصل ۷: تأثیر متقابل بین کمیت‌های الکترومغناطیسی و مکانیکی توصیف می‌شود. بسیاری از روش‌های متفاوت و متداول بیان شده و با هم مقایسه می‌شوند. در این جا، دیگر بار، بخش بزرگی از تجربهٔ ما، مقالات و نتایج در کنار هم ارائه می‌شوند که می‌تواند به‌صورت یک تلفیق مناسب از

<sup>۱</sup> Switchers

<sup>۲</sup> Actuators

<sup>۳</sup> Skew Effect

تحقیقات صورت گرفته توسط ما و گروه‌های دیگر در نظر گرفته شود. هم‌چنین، نتایجی درباره رفتار ارتعاشی ساختارهای EM (توزیع معادلات مکانیکی با معادلات EM) ارائه می‌شوند.

- فصل ۸: این بخش از کتاب به تلفات اختصاص داده می‌شود. مطالعات پیشرفته درباره جریان ادی، تلفات غیرعادی و هیستریزیس بیان می‌شوند. باید اشاره کنیم که موضوع آخر، یعنی هیستریزیس، تا آنگاه که محاسبات عددی و شبیه‌سازی تجهیزات مورد توجه باشند) اکنون به یک عنوان بسیار جالب و مهم برای مطالعه و تحقیق تبدیل شده و موضوع بسیاری از مقالات اخیر است. در این فصل، ما مدل‌سازی هیستریزیس و نحوه به‌کارگیری آن در کدهای FEM، با استفاده از روش‌های اثبات‌شده را ارائه می‌کنیم.

امیدواریم این کتاب اطلاعات مفید و معتبری برای دانشجویان و محققانی که با مسائل FEM سر و کار دارند، فراهم آورد.

در پایان، مایلم تا قدردانی صمیمانه خود را نسبت به بسیاری از همکاران و دوستان که به ما در تهیه مطالب ارائه‌شده در این کتاب کمک نمودند، ابراز کنیم. بدون حمایت و کمک آن‌ها انتشار این کتاب غیرممکن بود. به‌ویژه تشکر می‌کنیم از: دکتر ام. لاجویی-سازنک (LEEI-Toulouse) و پروفیسور سی. ریوکس (Univ. Paris VI)، اساتید راهنمای خود، که زمینه علمی لازم را برای تحقیقات و زندگی حرفه‌ای ما فراهم نمودند؛ پروفیسور ان. ایدا (Univ. of Akron) برای همکاری طولانی‌مدت، چندین جلسه بحث فنی و کمک شایان در ویرایش این کتاب؛ دکتر کو-بنگ (GRUCAD-UFSC) برای نگارش بخش قابل توجهی از فصل ۵؛ دکتر آر. سی. مسکوئیتا (UFMG)؛ پروفیسور جی. آر. کارڈسو (USP) و تیمشان برای همکاری پیوسته و حمایت‌های فنی؛ پروفیسور ای. کاست (T. U. Cottbus) برای همکاری‌ها و تبادلات فنی ایشان. بسیار ممنونیم از همکارانمان در GRUCAD-UFSC و دانشکده مهندسی برق دانشگاه فدرال سانتاکاتارینا به خاطر حمایت و دوستی پیوسته‌شان. هم‌چنین برای حمایت‌های مالی CNPq و CAPES (سازمان‌های علمی دولت برزیل) در کارهای تحقیقاتی خود سپاسگزاریم.

جوانو پدرو ای باستوس

نلسون سادوسکی

اهمیت ماشین‌های الکتریکی و سایر تجهیزات الکترومغناطیسی فرکانس پایین در دنیای صنعتی امروز غیر قابل انکار است. در واقع علاوه بر تجهیزات کوچک و بزرگ الکترومغناطیسی بی‌شمار، در حدود ۹۰٪ از کل انرژی الکتریکی تولیدی در دنیا به وسیله ژنراتورهای الکتریکی تولید می‌شوند و از طرف دیگر، در حدود ۷۰٪ از کل انرژی الکتریکی در سرتاسر جهان توسط موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود. از این رو بخش وسیعی از تحقیقات دانشگاهی و صنعتی به حوزه ماشین‌های الکتریکی اختصاص داده شده است. این تحقیقات شامل تمام جنبه‌های مربوط به تحلیل، طراحی، بهینه‌سازی و ساخت و مونتاژ تجهیزات است. در تمام این موارد باید از شماری مدل‌سازی‌های الکترومغناطیسی و مکانیکی استفاده شود.

می‌توان گفت که در بین تمام روش‌های مطرح برای مدل‌سازی الکترومغناطیسی، مکانیکی و ... ماشین‌های الکتریکی، روش اجزاء محدود دقیق‌ترین نتایج را ارائه می‌دهد، به گونه‌ای که اهمیت و کارایی بسیاری از روش‌های گذشته در مقابل روش بسیار کارآمدتر اجزاء محدود به تدریج در حال کم رنگ شدن می‌باشد. استفاده از روش اجزاء محدود در کشور ما نیز، به‌طور روزافزون در حال گسترش است. هرچند پیچیده‌تر بودن روش اجزاء محدود نسبت به سایر روش‌ها و نیاز به کامپیوترهای پیشرفته و پرسرعت در آن از جمله ویژگی‌های این روش ذکر می‌شود اما از نظر مترجمان این اثر، یکی از مهم‌ترین عوامل بهره‌گیری محدود و ناقص از نرم‌افزارهای اجزاء محدود تجاری، در دسترس نبودن مراجع علمی کافی در این حوزه است. علی‌رغم انتشار تعداد معدود کتاب درباره کاربرد روش اجزاء محدود در الکترومغناطیس به زبان فارسی (به‌صورت ترجمه یا تألیف)، به جرأت می‌توان گفت که فقدان یک کتاب کامل و جامع درباره مدل‌سازی تزویج الکترومغناطیسی، مکانیکی و حرارتی ماشین‌های الکتریکی به کمک روش اجزاء محدود، قویاً احساس می‌شود.

کتاب پیش رو حاصل سال‌ها تجربه علمی و تحقیقاتی تعدادی از متخصصان مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی به کمک روش اجزاء محدود است. در این کتاب تقریباً تمام موضوعات مورد نیاز به‌صورت مختصر و مفید بیان شده‌اند و بنابراین کتاب ترجمه‌شده پیش‌رو می‌تواند یک مرجع مناسب برای استفاده دانشجویان و پژوهش‌گران ایرانی به حساب آید. عنوان این کتاب "مدل‌سازی الکترومغناطیسی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود" است اما در آن به بیان تئوری اجزاء محدود بسنده نشده است و گستره‌ای وسیع از مطالب دیگر نیز در آن گنجانده شده است. این کار به بهترین صورت انجام گرفته است، بطوری‌که علاوه بر تئوری اجزاء محدود، تمام مطالب پیش‌نیاز برای ورود به بحث تحلیل اجزاء محدود در الکترومغناطیس و همچنین کاربردهای آن در تحلیل تجهیزات فرکانس پایین - به‌ویژه ماشین‌های الکتریکی - آورده شده‌اند. به این منظور، دو فصل نخست به مرور تئوری الکترومغناطیس و ابزارهای ریاضی مورد نیاز آن اختصاص داده شده است، فصل‌های سوم و چهارم تئوری اجزاء محدود و نحوه به‌کارگیری آن در تحلیل مسائل الکترومغناطیس را ارائه می‌دهند، تزویج معادلات مداری با معادلات اجزاء محدود در فصل پنجم بیان شده است، فصل ششم مدل‌سازی حرکت را در تجهیزات الکترومغناطیسی ارائه می‌دهد، فصل هفتم تأثیر متقابل بین کمیت‌های

الکترومغناطیسی و مکانیکی را توصیف می‌شود و در نهایت در فصل هشتم نحوه محاسبه تلفات آهنی در تجهیزات الکترومغناطیسی ارائه شده است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که خواننده این کتاب ضمن آشنایی با روش اجزاء محدود، مروری مفید بر مطالب پایه- نظیر تئوری الکترومغناطیس و تئوری مدارهای الکتریکی- خواهد داشت و همچنین با کاربردهای روش اجزاء محدود در تحلیل تجهیزات الکترومغناطیسی فرکانس پایین آشنا خواهد شد. به هر حال مترجمان بر این باورند که بی‌گمان این ترجمه خالی از اشکال نیست و بنابراین با دیده منت پذیرای همه راهنمایی‌ها، انتقادات و پیشنهادات خوانندگان گرامی برای بهره‌گیری در چاپ‌های بعدی کتاب، می‌باشند.

در پایان مترجمان این کتاب بر خود لازم می‌دانند نهایت سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از مساعدت‌های فراوان معاونت محترم پژوهش و فناوری جناب آقای دکتر علی اکبر پویان، ریاست محترم مرکز چاپ و نشر دانشگاه جناب آقای دکتر اسماعیل سلیمانی و کارکنان شریف آن حوزه بخصوص جناب آقای علی اکبر حسین سعیدی ابراز نمایند. تشکر ویژه داریم از همکاران گرامی جناب آقایان دکتر حسین مروی عضو هیئت علمی دانشکده برق و دکتر نوید فیروزی عضو هیئت علمی دانشکده معارف و علوم انسانی که به ترتیب زحمات ویراستاری علمی و ادبی این کتاب را به عهده گرفتند و ما را از نظرات ارزشمند خود بهره‌مند فرمودند.

احمد دارابی و حامد طحانیان