بسم الله الرحمن الرحیم

انتشارات
۹۰۳

توربین‌های بادی کوچک

تجزیه، تحلیل، طراحی و کاربرد

press.um.ac.ir

دیوید وود

ترجمه:
دکتر نعمت کرامت سیاوش
استادیار پژوهشی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
دکتر ندا مشهد گرمه

سرشناسه: وود، دیوید Wood, David (Energy consultant)
عنوان و نام پدیدآور: توربین‌های بادی کوچک تجزیه، تحلیل، طراحی و کاربرد/ دیوید وود ؛ ترجمه نعمت کرامت سیاوش، ندا مشهد گرمه؛ ویراستار علمی رسول خدابخشیان کارگر.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری: ۳۱۱ ص.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۹۰۳.
شابک: ISBN: 978-964-386-598-6
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا.
یادداشت: عنوان اصلی: Small wind turbines: analysis, design, and application, 2011.
یادداشت: کتابنامه. نمایه.
موضوع: توربین‌های بادی Wind turbines
انرژی بادی Wind power
شناسه افزوده: کرامت سیاوش، نعمت ۱۳۶۳-
شناسه افزوده: مشهد گرمه، ندا، ۱۳۶۸-
شناسه افزوده: خدابخشیان کارگر، رسول، ۱۳۶۳ -، ویراستار
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TJ۸۲۸
رده‌بندی دیویی: ۶۲۱/۴۵
شمارهٔ کتابشناسی ملّی: ۹۴۸۷۱۴۵

press.um.ac.ir

توربین‌های بادی کوچک؛ تجزیه، تحلیل، طراحی و کاربرد

پدیدآورنده: دیوید وود
ترجمه: دکتر نعمت کرامت سیاوش؛ دکتر ندا مشهد گرمه
ویراستار علمی: دکتر رسول خدابخشیان کارگر
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۲۰۰ نسخه، چاپ اوّل، زمستان ۱۴۰۲
چاپ و صحافی: چاپخانهٔ دقت
بها : ۲٫۲۰۰٫۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

انتشارات
۹۰۳

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار مؤلّف ۱۱
پیشگفتار مترجمان ۱۵
نمادها ۱۷
زیرنویس‌ها ۲۱
مخفّف‌ها ۲۲

فصل ۱. مقدّمه‌ای بر فنّاوری توربین‌های بادی ۲۳
۱-۱ چه مقدار انرژی در جریان باد وجود دارد؟ ۲۳
۱-۲ مثال‌هایی از توربین‌های بادی ۲۶
۱-۳ سروصدای توربین بادی ۲۹
۱-۴ پارامترهای عملکرد توربین بادی ۳۱
۱-۵ منحنی توان و عملکرد ۳۳
۱-۶ تغییرات سرعت باد و توان خروجی توربین با توجه به ارتفاع برج ۳۷
۱-۷ آشفتگی و مباحث آماری جریان باد ۳۹
۱-۸ طرح اوّلیه از قسمت‌های الکتریکی و مکانیکی توربین‌های بادی ۴۲
۱-۹ پارامترهای وابسته به اندازهٔ توربین ۴۷
۱-۱۰ معرفی منابعی برای کسب اطلاعات اضافی ۵۰
۱-۱۱ تمرین‌ها ۵۱
منابع ۵۴

فصل ۲. تحلیل حجم کنترل توربین‌های بادی ۵۵
۲-۱ مقدّمه ۵۵
۲-۲ حجم کنترل ۵۵
۲-۳ بقای جرم ۵۷
۲-۴ بقای مومنتوم ۵۹
۲-۵ بقای مومنتوم زاویه‌ای ۵۹
۲-۶ بقای انرژی ۶۰
۲-۷ مؤلّفه‌های کاری توربین و عملکرد بهینهٔ آن ۶۱

press.um.ac.ir

۲-۸ تمرین‌ها ۶۵
منابع ۶۶

فصل ۳. تئوری المان پرّه در توربین‌های بادی ۶۷
۳-۱ مقدّمه ۶۷
۳-۲ برخی از فرضیات تئوری المان پرّه ۶۸
۳-۳ معادلات بقا برای کانال‌های جریان حلقوی ۶۹
۳-۳-۱ بقای جرم ۶۹
۳-۳-۲ بقای مومنتوم ۷۰
۳-۳-۳ بقای ممنتم زاویه‌ای ۷۰
۳-۴ نیروهای عملگر بر روی المان جزء پرّه ۷۱
۳-۵ ترکیب معادلات برای کانال جریان و المان پرّه ۷۴
۳-۶ برنامهٔ متلب برای تحلیل المان پرّه ۷۴
۳-۷ برخی از ملاحظات معادلات تئوری المان پرّه ۸۰
۳-۸ تمرین‌ها ۸۱
منابع ۸۲

فصل ۴. هوابرها: برآ، پسا و گردش ۸۳
۴-۱ مقدّمه ۸۳
۴-۲ هندسه و تعاریف هوابرها ۸۴
۴-۳ برآ و پسای هوابر ۸۶
۴-۴ ضرایب برآ و پسای هوابر در زوایای حملهٔ بالا ۹۱
۴-۵ گردش بر روی هوابر ۹۵
۴-۶ بحث بیشتر بر روی عدد رینولدز، زاویهٔ حملهٔ بالا و نسبت ابعادی هوابرها ۹۷
۴-۷ مطالعهٔ بیشتر ۱۰۱
۴-۸ تمرین‌ها ۱۰۲
منابع ۱۰۳

فصل ۵. محاسبات المان پرّه ۱۰۵
۵-۱ مقدّمه ۱۰۵
۵-۲ تغییر برنامهٔ ارائه‌شده در فصل ۳ ۱۰۷
۵-۳ اجرای برنامه‌ها ۱۱۳

press.um.ac.ir

۵-۴ تغییر هوابر ۱۲۰
۵-۵ بیشینه کردن توان استخراجی ۱۲۱
۵-۶ مطالعهٔ بیشتر ۱۲۷
۵-۷ تمرین‌ها ۱۲۸
منابع ۱۲۹

فصل ۶. عملکرد توربین در هنگام شروع به کار و سرعت‌های پایین باد ۱۳۱
۶-۱ مقدّمه ۱۳۱
۶-۲ تخمین گشتاور شروع به کار ۱۳۵
۶-۳ تحلیل شروع به کار توربین ۱۳۹
۶-۴ تخمین اینرسی روتور ۱۴۳
۶-۵ برنامهٔ متلب برای شروع به کار ۱۴۴
۶-۶ تمرین‌ها ۱۴۹
منابع ۱۵۰

فصل ۷. طرّاحی، ساخت و ارزیابی پرّه ۱۵۱
۷-۱ مقدّمه ۱۵۱
۷-۲ روش بهینه‌سازی ۱۵۲
۷-۳ بهینه‌سازی برنامهٔ متلب ۱۵۴
۷-۴ طرّاحی پرّهٔ نمونه: یک توربین ۷۵۰ واتی ۱۵۸
۷-۵ ساخت پرّه ۱۶۷
۷-۶ تست پرّه ۱۷۳
۷-۷ شکل‌دهی روتور ۱۷۶
۷-۸ تمرین‌ها ۱۷۷
منابع ۱۷۸

فصل ۸. آیرودینامیک ناپایدار انحراف توربین و حفاظت آن در سرعت بیش‌ازحد ۱۷۹
۸-۱ مقدّمه ۱۷۹
۸-۲ مبانی آیرودینامیک دنبالچه‌ها ۱۸۱
۸-۳ آیرودینامیک ناپایدار دنبالچه‌ها ۱۸۴
۸-۴ تأثیر شکل دنبالچه بر عملکرد آن ۱۹۱
۸-۵ تأثیر روتور بر عملکرد یاوو ۱۹۴

press.um.ac.ir

۸-۶ نرخ بالای یاوو ۱۹۵
۸-۷ محافظت آیرودینامیکی در برابر سرعت بیش‌ازحد ۱۹۷
۸-۷-۱ فرلینگ ۱۹۷
۸-۷-۲ خواباندن توربین به پشت (پیچینگ) ۲۰۱
۸-۸ تمرین‌ها ۲۰۲
منابع ۲۰۴

فصل ۹. استفاده از مدل بار ساده‌سازی‌شدهٔ IEC در توربین‌های بادی کوچک ۲۰۵
۹-۱ مقدّمه ۲۰۵
۹-۲ مدل بار ساده‌سازی‌شده ۲۰۷
۹-۲-۱ حالت بار A: عملکرد عادی ۲۰۹
۹-۲-۲ حالت بار B: در حال یاوو ۲۱۰
۹-۲-۳ حالت بار C: خطای یاوو ۲۱۱
۹-۲-۴ حالت بار D: نیروی فشاری بیشینه ۲۱۱
۹-۲-۵ حالت بار E: سرعت دَوَرانی بیشینه ۲۱۲
۹-۲-۶ حالت بار F: اتّصال کوتاه در بار الکتریکی ۲۱۲
۹-۲-۷ حالتی بار G: خاموشی (ترمز) ۲۱۳
۹-۲-۸ حالت بار H: توربین پارک‌شده ۲۱۳
۹-۲-۹ حالت بار I: توربین پارک‌شده، شدیدترین حالت ۲۱۴
۹-۲-۱۰ حالت بار J: حمل‌ونقل، مونتاژ، تعمیر و نگهداری ۲۱۴
۹-۳ محاسبهٔ تنش و فاکتورهای ایمنی ۲۱۵
۹-۳-۱ مؤلّفه‌های تنش معادل ۲۱۵
۹-۳-۲ ضرایب ایمنی ۲۱۶
۹-۳-۳ تحلیل تنش نهایی ۲۱۷
۹-۳-۴ تجزیه‌وتحلیل خرابی براثرِ خستگی ۲۱۷
۹-۴ تجزیه‌وتحلیل بار ساده‌سازی‌شدهٔ توربین ۵۰۰ واتی ۲۱۷
۹-۴-۱ بارهای حالت A: عملکرد عادی ۲۱۸
۹-۴-۲ بارهای حالت B: یاوو ۲۱۹
۹-۴-۳ بارهای حالت C: خطای یاوو ۲۱۹
۹-۴-۴ بارهای حالت D: نیروی فشاری بیشینه ۲۲۰
۹-۴-۵ بارهای حالت E: سرعت دَوَرانی بیشینه ۲۲۰
۹-۴-۶ بارهای حالت F: اتّصال کوتاه در بار الکتریکی ۲۲۰

press.um.ac.ir

۹-۴-۷ بارهای حالت H: توربین پارک‌شده ۲۲۰
۹-۵ مؤلّفه‌های تنش معادل و استحکام نهایی مواد ۲۲۱
۹-۵-۱ تنش معادل برای حالت A: عملکرد عادی ۲۲۲
۹-۵-۲ تنش معادل برای حالت بار B: یاوو ۲۲۳
۹-۵-۳ تنش معادل حالت بار C: خطای یاوو ۲۲۳
۹-۵-۴ تنش معادل حالت بار D: نیروی فشاری بیشینه ۲۲۳
۹-۵-۵ تنش معادل حالت بار E: سرعت دَوَرانی بیشینه ۲۲۴
۹-۵-۶ تنش معادل حالت بار F: اتّصال کوتاه در خروجی ژنراتور ۲۲۴
۹-۵-۷ تنش معادل حالت بار H: توربین پارک‌شده ۲۲۴
۹-۶ صفحهٔ گستردهٔ مدل بار ساده‌سازی‌شده ۲۲۴
۹-۷ لزوم آزمایش بیشتر ۲۳۱
۹-۸ ملاحظات نهایی ۲۳۲
۹-۹ مطالعهٔ بیشتر ۲۳۳
منابع ۲۳۳

فصل ۱۰. طرّاحی و ساخت برج ۲۳۵
۱۰-۱ مقدّمه ۲۳۵
۱۰-۲ برج‌های تک‌ستونی ۲۳۸
۱۰-۳ بهینه‌سازی برج‌های تک‌ستونه ۲۵۱
۱۰-۴ برج‌های مشبّک ۲۵۴
۱۰-۵ برج‌های مهارشده با کابل ۲۶۰
۱۰-۶ تمرین‌ها ۲۶۲
منابع ۲۶۴

فصل ۱۱. ژنراتور و سیستم الکتریکی ۲۶۵
۱۱-۱ مقدّمه ۲۶۵
۱۱-۲ ژنراتور توربین‌های بادی کوچک ۲۶۷
۱۱-۳ گیربکس‌ها ۲۷۲
۱۱-۴ یکسوسازها، اینورترها و مباحث پایه‌ای کنترل ۲۷۳
۱۱-۵ حفاظت سیستم ۲۸۰
۱۱-۶ خاموش کردن دستی و پایش وضعیت ۲۸۴
۱۱-۷ سیم‌کشی ۲۸۵

press.um.ac.ir

۱۱–۸ حفاظت در برابر صاعقه ۲۸۶
۱۱–۹ مطالعهٔ بیشتر ۲۸۸
۱۱–۱۰ تمرین‌ها ۲۸۹
منابع ۲۹۰

فصل ۱۲. مکان‌یابی و نصب ۲۹۱
۱۲–۱ مقدّمه ۲۹۱
۱۲–۲ مکان‌یابی ۲۹۲
۱۲–۳ ارتفاع بهینهٔ برج ۲۹۷
۱۲–۴ بالا و پایین کردن توربین ۳۰۰
۱۲–۵ تمرین‌ها ۳۰۳
منابع ۳۰۶

نمایه ۳۰۷

press.um.ac.ir

پیشگفتار مؤلّف

استاندارد IEC ایمنی توربین‌های بادی کوچک، IEC 61400-2، توربین بادی کوچک را توربینی تعریف می‌کند که مساحت جاروب‌شده توسط روتور آن کمتر از ۲۰۰ مترمربع و توان نامی آن حدوداً ۵۰ کیلووات باشد. این تعریف تقریبی در این کتاب استفاده خواهد شد و همانند استاندارد مذکور، فقط توربین‌های بادی محور افقی را پوشش خواهد داد.

تا اوایل قرن بیستم، همهٔ توربین‌های بادی حداقل ازنظرِ توان خروجی کوچک بودند و به‌جای تولید برق، اغلب برای پمپاژ آب و آسیاب غلات استفاده می‌شدند. یکی از اوّلین توربین‌های کوچک بادی که برای تولید برق استفاده شد، در شکل زیر نشان داده شده است. این توربین توسط ادوارد برن طرّاحی و توسط شرکت *برادران انگلیسی از ویسباخ انگلستان* ساخته شده است.

در سال ۱۹۲۴ یکی از آسیاب‌های بادی برن در مزرعه‌ای متعلّق به راسل گریموید در استرالیا که شرایط آن مشخص نیست، نصب شد. گریموید در این مورد چنین نوشته است:

شبکهٔ برق هیچ‌کجا در دسترس نیست. روشنایی مصنوعی باید ارائه شود و در اینجا ما غیرعادی بودن خود را به‌طور کامل نشان دادیم. آسیاب بادی بزرگی از نوع هلندی بر روی یک برج زیبای چوبی ساخته شد که باتری‌ها را در پایهٔ خود جای داده بود. ازنظرِ هنری، نمرهٔ کامل را کسب کرد، ولی در تولید مؤثر برق، به‌سختی یک امتیاز کسب کرد... .

آسیاب مهندسی بدی دارد و به‌راحتی در مسیر باد قرار نمی‌گیرد و برگشتن ناگهانی آن به‌سمت عقب باعث شکستن اجزا می‌شود ... . من هنوز معتقدم که روزی انسان از نیروی باد برای اهداف خود استفاده خواهد کرد و احساس می‌کنم با اثبات اینکه روش من روش درستی نبوده است، در تحقیقات آینده شریک خواهم بود.

توربین بادی کوچک در مزرعه متعلّق به راسل گریموید- دههٔ ۱۹۲۰ میلادی

press.um.ac.ir

هدف این کتاب آن است که نشان دهد یک قرن بعد، توربین‌های بادی کوچک می‌توانند به‌گونه‌ای طرّاحی و ساخته شوند که بسیاری از مشکلاتی که گریموید با آن روبه‌رو بود را نداشته باشند. این بدان‌معنا نیست که فنّاوری توربین‌های کوچک کامل است؛ هنوز موضوعاتی وجود دارد که در آن‌ها نسبت به توربین‌های بزرگ بسیار عقب مانده است. این عقب‌افتادگی‌ها در جای‌جای این کتاب که برای ارائهٔ تجزیه‌وتحلیل اوّلیه و دستورالعمل‌های طرّاحی مخصوص دانش‌آموختگان ارشد مهندسی یا مهندسان ارشد برای طرّاحی و ساخت یک توربین بادی کوچک تدوین شده، آشکار شده است. رویکرد این کتاب از «مدل بار ساده‌سازی‌شده» (SLM) IEC-61400-2 پیروی می‌کند که در فصل ۹ تشریح شده است. در این فصل معادلات مستقیم برای برآورد تقریبی بارهای اصلی روی توربین و تنش‌های اجزا ارائه شده است. معادل SLM در استاندارد IEC برای توربین‌های بزرگ وجود ندارد.

در کنار این استاندارد، حداقل پنج حوزه وجود دارد که در آن یک دانشجو یا گروه طرّاحی به مشاورهٔ تخصّصی اضافی نیاز خواهد داشت:

- تجزیه‌وتحلیل اجزای محدود (FEA) برای محاسبهٔ دقیق تنش اجزای مهم
- مشاورهٔ مهندسی برق درمورد ژنراتور و یکسوساز و احتمالاً اتّصال اینورتر و شبکه
- تجزیه‌وتحلیل دینامیک دقیق برای محاسبات دقیق‌تر تنش و تحلیل خستگی
- طرّاحی پی
- مهندسی کنترل که به تدوین و اجرای استراتژی کنترلی کمک می‌کند.

اوّلین مورد به‌راحتی در دسترس است؛ زیرا FEA درحال‌حاضر یک ابزار مهندسیِ استاندارد است. در فصل ۱۰ از این ابزار برای طرّاحی و ساخت برج استفاده شده است. در مورد دوم، فرض بر این است که ژنراتور توربین به‌جای طرّاحی و ساخت به‌عنوان بخشی از پروژه، انتخاب و خریداری می‌شود. بنابراین دانش موردنیاز در این سطح را می‌توان از متون استاندارد در این زمینه به دست آورد. چند موضوع خاص توربین‌های کوچک در فصل‌های ۱، ۷ و ۱۱ موردبحث قرار گرفته است. موضوع تجزیه‌وتحلیل دینامیک دقیق توربین‌های بادی کوچک براساس مدل‌سازی «آیروالاستیک» هنوز تکامل نیافته است، اما بدون‌شک با ساخت و آزمایش توربین‌های کوچک بیشتر توسعه خواهد یافت. برخی از منابع برای مدل‌سازی آیروالاستیک در بخش «مطالعهٔ بیشتر» فصل ۹ معرفی شده است. طرّاحی پی معمولاً به مکان نصب (سایت) بستگی دارد، اما همان‌طور که در فصل ۱۰ نشان داده شده است، نیروها و گشتاورهای واژگونی وارده به پی مستقیماً محاسبه می‌شوند. در چند سال گذشته کتاب‌های تخصّصی زیادی درمورد کنترل و اتّصال به شبکهٔ توربین‌های بادی نوشته شده‌اند که مهندسان مکانیک و آیرودینامیک نمی‌توانند بر آن‌ها تسلّط کافی داشته باشند. بسیاری از مسائل پایه‌ای کنترل توربین‌های بزرگ و کوچک مشترک است. در کتاب‌های مذکور موارد غیرمشترک در فصل‌های مخصوص نگاشته می‌شوند.

توربین‌های کوچک ازنظرِ طرّاحی و ساخت پرّه تفاوت‌های قابل‌توجهی با توربین‌های بزرگ دارند.

press.um.ac.ir

تفاوت‌های اصـلی عبارت‌اند از: اعداد رینولدز عملیاتی پایین (Re)، نیاز به عملکرد خوب در بادهای با سـرعت پایین، حتّی در Re پایین و الزامات سازه‌ای پرّه‌ها که با سرعت بیشتری می‌چرخند. این مسائل در شش فصل اوّل پوشش داده شده‌اند و در فصل ۷ با بهینه‌سازی و ساخت پرهٔ چندبعدی به اوج خود می‌رسند. اکثر توربین‌های کوچک از «یاوو آزاد» استفاده می‌کنند که در آن از دنبالچه به‌جای سیستم مکانیکی برای چرخش و قرار دادن روتور در مسیر باد استفاده می‌شود. رفتار یاوو و مسائل مربوط به طرّاحی دنبالچه و حفاظت آیرودینامیکی در برابر سرعت بیش‌ازحد در فصل ۸ پوشش داده شده است.

چندین برنامه در محیط Matlab برای تجزیه‌وتحلیل و طرّاحی توربین‌های بادی در این کتاب توصیف و لیست شده‌اند. این برنامه‌ها و برنامه‌های تکمیلی که در متن کتاب به آن‌ها اشاره شده است، اما لیست نشده‌اند را می‌توانید از http://extras.springer.com دریافت کنید. موارد برخط شامل موارد اضافی مربوط به توربین‌های کوچک و راه‌حل تمرینات پایان فصل است. این برنامه‌ها شامل روش المان پرّه (فصل ۵)، روش‌های بهینه‌سازی چندبعدی برای طرّاحی پرّه‌ها (فصل ۷) و طرّاحی برج‌ها (فصل ۱۰) است. برای برآورد سروصدا (فصل ۱) و بارها و تنش‌های اجزا با استفاده از مدل بار ساده‌سازی‌شدهٔ IEC صفحات اکسلی ارائه شده است. همهٔ برنامه‌ها و صفحات اکسلی که در کتاب به آن‌ها اشاره شده است، توسط نویسنده نوشته یا بازنویسی شده و برای تجزیه‌وتحلیل واقعی توربین و طرّاحی آن‌ها استفاده شده است. بنابراین احتمال خطا در آن‌ها اندک است، اما صفر نیست؛ آن‌ها بدون ضمانت ارائه می‌شوند. همین امر درمورد برنامه‌های تکمیلی نیز که برخی از آن‌ها توسط دیگران نوشته شده، صادق است.

این کتاب عصارهٔ بیش از ۲۵ سال تجربهٔ کار، تحقیق، توسعه و تجاری‌سازی درزمینهٔ توربین‌های بادی کوچک است. در طول این سال‌ها، کار من توسط شورای تحقیقات استرالیا، صندوق تحقیق و توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر NSW، برنامهٔ توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر NSW و مشارکت آسیا- اقیانوسیه در توسعهٔ پاک حمایت شد. یک سال بسیار مهم در مرکز تحقیقات ایمز ناسا در ایالات‌متّحده تأمین مالی شد. افراد زیادی هستند که باید از آن‌ها به‌خاطر کمکشان تشکّر کنم: از پروفسور فیل کلاوزن و پل پترسون که آن زمان وقت بسیار زیادی را با هم بودیم، قدردانی می‌کنم. همچنین، پل و استورات ویلسون کمک زیادی درزمینهٔ راه‌اندازی و توسعهٔ یک شرکت توربین بادی کوچک، Aerogenesis Australia، که اتفاقاً اوّلین نصب تجاری خود را در مزرعه‌ای در ویکتوریا داشته است، به من داشتند که از آن‌ها نیز تشکّر و قدردانی می‌کنم. استوارت ویلسون و فیل کلوسن به ترتیب FEA برج تک‌ستونه و مشبّک ارائه‌شده در فصل ۱۰ را تهیه کردند. جیسون براون نسخهٔ اوّلیهٔ صفحهٔ گستردهٔ SLM فصل ۹ را نوشت. دانشجویان سابق من از فیل کلوسن گرفته تا دکتر متیو کلیفتون اسمیت کمک شایانی به افزایش دانش به من کردند. اسم اکثر آن‌ها به‌عنوان نویسندگان همکار در نشریاتی که در متن اصلی به آن‌ها ارجاع شده است، دیده می‌شود. من همچنین از بسیاری از همکاران دیگر در سراسر جهان برای ارائهٔ اطلاعات خاص، پاسخ به سؤالات من، گوش دادن به افکارم و توسعهٔ آن‌ها در مواقع ضروری تشکّر می‌کنم. نسخه‌های قبلی برخی از فصل‌ها به‌صورت سخنرانی در دانشگاه نیوکاسل، جایی که من بیشتر آن ۲۵

سال را در آنجا گذراندم، و برای یک دورهٔ کوتاه در دانشگاه کاتماندو که توسط دکتر پیتر فری سازمان‌دهی شده بود، ارائه شد. این مطالب در اوّلین سال تصدّی من در کرسی انرژی‌های تجدیدپذیر ENMAX/Schulich در دانشگاه کلگری به‌روز شده و به این شکل درآمده است. من از دانشگاه و شرکت ENMAX به‌خاطر دیدگاه مثبتشان به حمایت از تولید پراکنده که در اینجا به شکل توربین‌های بادی کوچک است، تشکّر می‌کنم.

برای کمک‌های ویژهٔ پیتر فری و پروفسور اد نوویکی که فصل ۱۱ را نوشتند، تشکّر می‌کنم. فیل کلاوزن و استرت ویلسون نظریات ارزشمندی را درمورد فصل ۱۰ ارائه کردند و استرت از مهارت‌های ساخت پرهٔ خود برای بهبود فصل ۷ استفاده کرد. دکتر دامین از شرکت Cyclopic Energy فصل ۱۲ را بررسی و دو عکس نیز ارائه کرد. جیم باکستر، کالین دومیس و روبرت فالکنر از شرکت ENMAX عکس‌ها و اطلاعات زیادی را در اختیار گذاشتند. کالین همچنین چندین وب‌سایت جالب را که در کتاب به آن‌ها اشاره شده است، به من معرفی کرد. محمد همام کلّ نسخهٔ پیش‌نویس را خواند، برنامه‌ها را بررسی کرد و تعداد قابل‌توجهی از اشتباهات تایپی را پیدا و تصحیح کرد.

در این مرحله مرسوم است که نویسندگان پس از نگارش کتاب از خانوادهٔ خود برای بردباری‌شان تشکّر کنند. من این کار را نمی‌کنم؛ زیرا فرزندانم خانه را ترک کرده‌اند و شریک زندگی من، دکتر کاساندرا آرنولد، در این مدت به‌عنوان پزشک بدون مرز در آفریقا کار می‌کرد. بااین‌حال، تأثیر، توصیه‌ها و نگاه نقّادانهٔ او باعث می‌شود تا از او سپاسگزار باشم. من همچنین از دخترم، کتی، تشکّر می‌کنم که مرا با برن و گریموید آشنا کرد.

یکی از لذّت‌های بزرگ من در ۲۵ سال گذشته، ملاقات با افرادی از سراسر جهان بوده است که علاقه زیادی به فنّاوری توربین‌های بادی کوچک و نقش آن در کاهش تغییرات آب‌وهوایی و عدم توازن عظیم توزیع ثروت و سلامتی در این جهان دارند. من این کتاب را به آن‌ها تقدیم می‌کنم و امیدوارم که به تلاششان ادامه دهند. در این زمینه، من موافقت سخاوتمندانه و مشتاقانهٔ انتشارات اشپرینگر برای قیمت‌گذاری ویژهٔ کشورهای درحال‌توسعه را می‌ستایم. تمام عایدیِ این کتاب برای پیشبرد انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای درحال‌توسعه استفاده خواهد شد.

دیوید وود
کلگری- می ۲۰۱۱

press.um.ac.ir

پیشگفتار مترجمان

سپاس بیکران خداوند بی‌همتا را که علم را سلاح بشر کرد و دانش را چراغ راه او. کتابی که پیش‌روی شماست، نوشتهٔ پروفسور دیوید وود از دانشگاه کلگری کاناداست که سال‌های زیادی به‌صورت عملی و تئوری روی توربین‌های بادی کوچک کار کرده است. من اوّلین‌بار این کتاب را برای انجام رسالهٔ دکتری‌ام مطالعه کردم؛ کتابی با زبانی بسیار گُنگ (البته در سطح دانش من از زبان انگلیسی)، ولی پُر از مطالب ناب علمی و عملی ارزنده. درک بعضی از جملات گاهی به‌اندازهٔ خواندن چندین صفحه کتاب زمان بُرد، ولی ارزشش را داشت. درهرصورت، این سختیِ زبان نویسنده و مطالب واقعاً زیبای کتاب انگیزه‌ای شد برای ترجمه‌ای روان از آن. این کتاب را به‌همراه دوست و همسرم ترجمه و سامان دادیم. سعی ما در ترجمه، انتقال مطلب به‌طور کامل و روان و با حفظ امانت بوده است.

این کتاب می‌تواند کمک و دیدِ خوبی به دانشجویان تحصیلات تکمیلی و مهندسان فعّال در حوزهٔ توربین‌های بادی کوچک دهد، اما برای کسانی که بخواهند با توربین آشنا شوند، کتاب سختی خواهد بود. و اما دو نکته:

- برای دانلود کدهای ضمیمه از سایت http://extra.springer.com از ISBN 978-1-84996-174-5 مربوط به سال ۲۰۱۱ استفاده کنید.
- در برخی موارد که توضیحات اضافه توسط مترجم اضافه شده، مطلب درون پرانتز و با فونت کوچک‌تر است.

امیدواریم با خواندن این کتاب بتوانید به‌راحتی انرژی بادی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنید؛ قطعاً برای مهندسانی که با برق و مکانیک به‌اندازهٔ کافی آشنا هستند، کار سختی نخواهد بود. لطفاً و حتماً پس از مطالعهٔ کتاب، نظریات ارزشمندتان را درمورد ترجمه و مطالب کتاب با ما در میان بگذارید.

به امید فراگیر شدن تولید انرژی ارزان و پاک در زمین

نعمت کرامت سیاوش و ندا مشهدگرمه

تابستان ۱۴۰۲

press.um.ac.ir

نمادها و مخفّف‌ها

به‌دلیل گستردگی موضوعات تحت‌پوشش، تعدادی از نمادها دارای معانی متعددی هستند، مانند R که هم برای شعاع نوک پرّه و هم برای مقاومت الکتریکی (اهم) به کار می‌رود. نمادی که فقط برای یک فصل معنای خاصی دارد، با دادن شمارهٔ فصل نشان داده شده است. بسیاری از نمادهایی که فقط در فصل ۹ استفاده شده و در IEC 61400-2تعریف شده، در اینجا فهرست نشده‌اند. جدول ۹–۱ نمادهای مورداستفاده در این کتاب را که با نمادهای استاندارد متفاوت است، فهرست کرده است.

press.um.ac.ir

نمادها

مساحت جاروب‌شده توسط پرّه‌ها (m^2)	A
ضریب در معادلهٔ ۴-۶	A
سطح مقطع هوابر (m^2)، فصل ۶	A
مساحت بالهٔ دنبالچه (m^2)، فصل ۸	A
سطح مقطع اجزای سازه‌ای (m^2)، فصل ۱۰	A
نسبت ابعادی	AR
به‌ترتیب عوامل القای محوری و چرخشی	a, a'
فاکتور وزن در بهینه‌سازی تکاملی	a
طول جانبی برج چندضلعی (m)، فصل ۱۰	a
طول عمر کاری، فصل ۴۴	a
ضرایب در معادلهٔ ۱۰-۶	a_0, a_1, a_2
ضریب در معادلهٔ ۴-۷	B
عرض بالهٔ دنبالچه (m)	b
بردار اساسی برای بهینه‌سازی تکاملی، معادلهٔ ۷-۱	b
چگالی احتمال تجمّعی معادلهٔ ۱-۱۸	C
ضریب در معادلهٔ ۴-۷	C
ضریب نیروی محوری، معادلهٔ ۳-۱۰	C_a
ضریب نیروی مماسی، معادلهٔ ۳-۱۱	$C_{a'}$
ضریب پسای سه‌بُعدی	C_D
ضریب درگ دوبُعدی	C_d
حداقل ضریب پسا	C_{d0}
ضریب برآی سه‌بُعدی	C_L
ضریب برای دوبُعدی	C_l
C_l مربوط به حداکثر نسبت برآ:پسا	$C_{l,max}$
ضریب توان، معادلهٔ ۱-۷	C_P
ضریب فشار سطح هوابر، فصل ۴	C_P
ضریب توان استخراجی، فصل ۷	$C_{P,r}$
ضریب گشتاور	C_Q
ضریب نیرو (رانش) معادلهٔ ۱-۱۳	C_T
وتر پرّه (m)	c

press.um.ac.ir

بردار مقایسهٔ بهینه‌سازی تکاملی	$\boldsymbol{c}$
پسای روی بدنهٔ سه‌بُعدی (N)	D
پسا در واحد ارتفاع بر (N/m)، فصل ۱۰	D
پسا در واحد طول بر روی بدنهٔ دوبُعدی (N/m)	d
قطر برج (m)، فصل ۱۰	d
فاصله از توربین (m)، فصل ۱	d
فاصله از روتور تا محور یاوو (m)، فصل ۸	d
قطر بالای برج (m)	d_0
شیب خطّی برج مخروطی	d_1
قطر پایهٔ برج (m)	d_h
مدول یانگ (GPa)	E
خارج از مرکزیت جرم روتور (m)، فصل‌های ۷ و ۹	E
ضریب اتلاف نوک پرنتل، معادلهٔ ۵–۱	F
تنش تسلیم (MPa)	F_y
عبارتی در ضریب اتلاف نوک پرنتل، معادلهٔ ۵–۲	f
شتاب ناشی از گرانش $= 9.81 \frac{m}{s^2}$	g
ارتفاع مؤثر توربین (m)، فصل ۱)۲	H
ارتفاع برج (m)	h
ارتفاع بهینه برج (m)، فصل ۱۲	h_{opt}
ارتفاع مرجع (m)، معادلات ۱–۱۴ و ۱–۱۵	h_r
تورفتگی روی بال دلتا، فصل ۸	i
ممان اینرسی حول محور یاوو (kgm^2)، فصل ۸	I
ممان سطح (m^2)، فصل ۱۰	I
جریان (آمپر)، فصل ۱۱	I
انتگرال در معادلهٔ ۶–۱۰	I_1, I_2, I_3
معادلات انتگرال وتر–گام، معادلات ۶–۶ و ۶–۷	I_{cp}
شدت آشفتگی، معادلهٔ ۱–۱۷	I_u
اینرسی چرخشی $(kg\ m^2)$	J
شیب منحنی برآی بال دلتا $(1/rad)$	K
ضرایب ناپایداری جسم باریک، رابطهٔ ۸–۸	K_1, K_2, K_3
ضرایب پولاموس بال دلتا، رابطهٔ ۸–۲	K_p, K_v
فاکتور عددی در معادلهٔ ۸–۱	k
برآی روی جسم سه‌بُعدی (N)	L
سطح سروصدا (dBA)، معادلهٔ ۱–۶	L_A
سطح توان صدا (dB)، معادلهٔ ۱–۴	L_p

press.um.ac.ir

نیروی برآ در واحد طول روی بدنهٔ دوبُعدی (N/m)	l
فاصلهٔ پایهٔ برج تا مرکز جرم توربین (m)، فصل ۱۲	l
گشتاور (Nm)	M
گشتاور خمشی در ریشهٔ پرّه (Nm)	M_0
نما در قانون توان، معادلهٔ ۱-۴	m
جرم برج (kg)	m_t
جرم توربین (جرم بالای برج) (kg)	m_{tt}
تعداد پرّه‌ها	N
تعداد چرخه‌های خستگی تا شکست	N_{cycles}
میانگین سالانهٔ تعداد صاعقه، فصل ۱۱	N_d
تعداد قطب ژنراتور	N_P
تعداد بخش برج	N_s
تعداد چرخه‌های خستگی	n
اوّلین فرکانس طبیعی سازه‌ای (Hz)، فصل ۱۰	n_1
سرعت ژنراتور سنکرون (rpm)، فصل ۱۱	N_s
توان (W)	P
فشار سطح هوابر (Pa)، فصل ۴	P
فشار روی سطح رو به باد و پشت به باد روتور (Pa)، فصل ۲	P_1, P_2
توان متوسط (W)	$\bar{P}$
تابع چگالی احتمال، معادلهٔ ۱-۱۹	p
گام گردابه، فصل ۶	p
گشتاور (Nm)	Q
دبی حجمی (m^3/s)، فصل ۲	Q
گشتاور مقاومت (Nm)	Q_r
شعاع نوک پرّه (m)	R
مقاومت (اهم)، فصل ۱۱	R
عدد رینولدز	Re
مختصات شعاعی در امتداد پرّه (m)	r
فاصلهٔ مرکز دنبالچه تا محور یاوو (m)، فقط فصل ۸	r
نیروی فشاری توربین (N)	T
دما (°C)	T
کشش کابل (N)، فصل ۱۲	T
طول عمر طرّاحی توربین	T_d
زمان شروع به کار (s)	T_s
زمان (s)	t
ضخامت هوابر، فصل ۴	t
ضخامت برج (m یا mm)، فصل ۱۰	t
بردار آزمایشی برای بهینه‌سازی تکاملی	t
سرعت باد (m/s)	U
سرعت باد برای توان نامی (m/s)	U_p

press.um.ac.ir

سرعت باد در دوردست (m/s)	U_∞
سرعت محیطی نوک پرّه (m/s)	U_{tip}
سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر (m/s)	U_{10}
سرعت باد در ارتفاع هاب (m/s)	U_0
سرعت باد برای شروع (m/s)	U_s
سرعت کلّ المان پرّه (m/s)	U_T
سرعت محیطی (m/s)	W
فاصله در امتداد خط وتر (m)، فصل ۴	x
طول بازوی دنبالچه (m)، فصل ۸	x
فاکتورها در معادلهٔ ۵-۶	Y_1, Y_2
طول زبری (m)	z_0
ضریب جذب صدا در اتمسفر (dB/m)، معادلهٔ ۱-۶	α
زاویهٔ حمله (rad)	α
زاویهٔ حمله به‌ازای حداکثر برآ: پسا (rad)	α_{max}
گردش (m^2/s)	Γ
نسبت میرائی	ζ
بازدهی	η
زاویهٔ یاوو (rad)	θ
زاویهٔ تابیدگی پرّه (rad)	θ_p
جهت باد (rad)، فصل ۸	φ
نسبت سرعت نوک پرّه، معادلهٔ ۱-۱۰	λ
نسبت سرعت نوک پرّه در پایان فرایند شروع به کار	λ_f
نسبت سرعت نوک پرهٔ توان نامی	λ_p
نسبت سرعت نوک محلّی، معادلهٔ ۳-۷	λ_r
نسبت سرعت نوک پرّه برای شروع	λ_s
گران‌رَوی هوا $(kg/m/s)$	μ
ویسکوزیتهٔ سینماتیکی هوا (m^2/s)	ϑ
چگالی (kg/m^3)	ρ
صلبیت المان پرّه، معادلهٔ ۳-۱۴	σ
تنش قطعات (MPa)، فصل‌های ۹ و ۱۰	σ
تنش محوری (MPa)، فصل ۱۰	σ_a
تنش خمشی (MPa)، فصل ۱۰	σ_a
سرعت پرّه (معمولاً rad/s)	$\boldsymbol{\Omega}$
زاویهٔ ورودی پرّه (rad)، معادلهٔ ۳-۸	ϕ
زاویهٔ سمتی (rad)، فصل ۸	ϕ
نرخ یاوو (rad/s)	ω
فرکانس طبیعی	ω_n

press.um.ac.ir

زیرنویس‌ها

بالادست توربین (زیاد)	0
سمت رو به باد توربین	1
سمت پشت به باد توربین	2
دور دست	∞
پرّه	b
مقدار طرّاحی	$design$
خط به خط	LL
حداکثر مقدار	max
توان نامی	P
شروع به کار	s
برج	t
بالای برج	tt
دنبالچه	$tail$
زمان میانگین	$overbar$

press.um.ac.ir

مخفّف‌ها

1P	Blade Passing Frequency	فرکانس عبور پرّه
AC	Alternating Current	جریان متناوب
AS	Australian Standard	استاندارد استرالیا
ASCE	American Society of Civil Engineers	انجمن مهندسان عمران آمریکا
BE	Blade Element	المان پرّه
BET	Blade Element Theory	نظریهٔ المان پرّه
CF	Capacity Factor	فاکتور ظرفیت
CV	Control Volume	حجم کنترل
DC	Direct Current	جریان مستقیم
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	ترانزیستور دوقطبی با دروازهٔ عایق‌بندی‌شده
IEC	International Electrotechnical Commission	کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	مؤسّسهٔ مهندسان برق و الکترونیک
IG	Induction Generator	ژنراتور القایی
FEA	Finite Element Analysis	تجزیه‌وتحلیل المان محدود
GL	Germanischer Lloyd	گرمانیشر لوید
KE	Kinetic Energy (J)	انرژی جنبشی (J)
MPPT	Maximum Power Point Tracking	ردیابی حداکثر توان
NACA	U.S. National Advisory Committee on Aeronautics	کمیتهٔ رایزنی ملی هوانوردی آمریکا
NREL	U.S. National Renewable Energy Laboratory	آزمایشگاه ملّی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات‌متّحده
ODE	Ordinary Differential Equation	معادلهٔ دیفرانسیل معمولی
PD	Power Density (W/m^2)	چگالی توان (W/m^2)
PMG	Permanent Magnet Generator	ژنراتور آهن‌ربای دائمی
RMS	Root Mean Square	مجذور میانگین ریشه
SCI	The Steel Construction Institute	مؤسّسهٔ سازه‌های فولادی
SLM	IEC Simple Load Model	مدل بار ساده‌سازی‌شدهٔ IEC
THD	Total Harmonic Distortion	اعوجاج هارمونیک کل

uress.um.ac.ir