

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر دنباله‌ی توربین بالادست منحرف شده بر عملکرد
توربین پایین دست، در آرایش پشت سرهم دو توربین باد مدل شده با

استفاده از روش LES

استاد راهنما

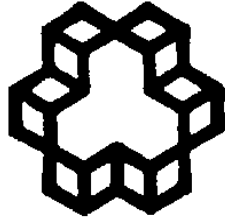
دکتر مجید بازارگان

نگارش

محمد رضا قنبری

تابستان ۹۲

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

بررسی تاثیر دنباله‌ی توربین بالادست منحرف شده بر عملکرد توربین پایین دست، در

آرایش پشت سرهم دو توربین باد مدل شده با استفاده از روش LES

توسط محمدرضا قنبری صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی

ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی با رتبه مورد تایید قرار می دهد.

آقای دکتر مجید بازارگان

۱- استاد راهنما

آقای دکتر مسعود ضیاء بشرحق

۳- ممتحن داخلی

آقای دکتر مهرزاد شمس

۴- ممتحن داخلی

آقای دکتر مسعود ضیاء بشرحق

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده

موضوع پایان نامه: بررسی تاثیر دنباله‌ی توربین بالادست منحرف شده بر عملکرد توربین پایین-

دست، در آرایش پشت سرهم دو توربین باد مدل شده با استفاده از روش LES

استاد راهنما: آقای دکتر مجید بازارگان

دانشجو: محمدرضا قنبری

شماره دانشجویی: ۹۰۰۶۹۲۴

اینجانب محمدرضا قنبری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل

انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که

تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب

نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره

شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرک یا

امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب

مصوب دانشگاه بطور کامل رعایت شده است.

.....

.....تاریخ

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع، مجاز نمی باشد.

پیشکش به:

کودکان کار محروم از تحصیل سرزمینم

تقدیر و تشکر

سپاس آن یگانه معبودی را که علمش بی‌کران است. بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادرم که عاشقانه سوختند تا گرمابخش دستان سرد و روشنی بخش راه‌تار من باشند، صمیمانه قدردانی کنم. از دو برادر و تنها خواهرم که همواره کمک حال روزگار سخت تحصیلی‌ام بوده‌اند سپاسگزارم. از دایی مهربانم که از هیچ کوششی در دوران تحصیلی من در حداقل نمودن مشکلات پیش آمده دریغ ننمودند تشکر می‌کنم. از خاله‌ی معلم سرکار خانم صدیقه افضلی که از ایشان درس انسانیت آموختم، سپاسگزاری می‌کنم. همواره به دنبال فرصتی بودم تا بتوانم از معلم کلاس سوم دبستانم سرکار خانم ثریا سالاری به دلیل زحمات غیرقابل توصیفشان قدردانی نمایم و کنون که مجال برای این مهم فراهم آمده است سر تعظیم در مقابل عظمت ایشان فرود می‌آورم. از جناب سرهنگ علی بنی‌اسدی و خانواده‌ی محترمشان که همواره همچون خانواده‌ام پشتیبان من بوده‌اند سپاسگزارم. از آقایان علی و محمد حسین‌خانی به دلیل کمک‌هایی که در انجام این پایان‌نامه به من نمودند قدردانی می‌کنم. از هم‌اتاقی‌های مهربانم که معاشرت با ایشان تجربه‌ای تکرار نشدنی است، تشکر می‌کنم. از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر مجید بازارگان که راز و رمز کشف معانی بدیع و تجلی جلوه‌های معرفت انسانی را به تمام معنا در وجودشان دیدم، سپاسگزاری می‌کنم. بی‌شک عرصه‌ی علم مدیون انسان‌های وارسته‌ای چون ایشان می‌باشد.

با احترام

محمدرضا قنبری

چکیده

در این تحقیق به بررسی ناحیه‌ی دنباله‌ی یک توربین که نسبت به جهت باد، منحرف شده است پرداخته می‌شود. این کار با هدف کمینه نمودن اثر مخرب دنباله و مطالعه‌ی عملکرد توربین پایین دست در یک چیدمان پشت سرهمی صورت می‌پذیرد. از روش شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ برای تحلیل میدان جریان آشفته استفاده شده است. برای این منظور میدان جریان توربین بالادست در هنگامی که تحت زوایای انحرافی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه نسبت به باد وارد شونده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی شده است. نتایج آزمایشگاهی مربوط به زاویه‌ی صفر درجه یعنی هنگامی که توربین باد به طور مستقیم مورد اصابت باد وارد شونده قرار می‌گیرد موجود می‌باشد. از این داده‌ها به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی این مطالعه استفاده گردیده است. تحلیل‌ها توسط نرم‌افزار فلونت و با استفاده از یک مش باسازمان انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که گرچه منحرف کردن توربین بالادست باعث کاهش توان تولیدی توسط توربین مذکور می‌گردد اما این امر سبب افزایش کیفیت باد وارد شونده به توربین پایین دست و در نتیجه بهبود عملکرد مجموعه می‌شود. در نهایت مشاهده شد هنگامی که فاصله‌ی جدایی دو توربین ۱۰ می‌باشد زاویه‌ی انحراف بدست‌آمده برای بهبود عملکرد مجموعه ۱۰ درجه است. این زاویه برای فاصله‌ی جدایی ۵، ۲۰ درجه به دست آمد. همچنین وابستگی زاویه‌ی انحراف پیشنهادی به فاصله‌ی مابین دو توربین مشاهده شد.

کلمات کلیدی: توربین باد محور افقی، زاویه‌ی انحراف، شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ، تغییرات

تولیدتوان

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول - درآمد
۲.....	۱. مقدمه
۲.....	۱-۱. سابقه‌ی تاریخی
۳.....	۲-۱. وضعیت کنونی انرژی باد در جهان
۳.....	۱-۲-۱. وضعیت کشورهای پیشتاز
۵.....	۲-۲-۱. وضعیت ایران
۹.....	۳-۱. توربین باد
۱۰.....	۴-۱. انواع مزارع باد
۱۱.....	۱-۴-۱. مزرعه‌ی باد فرساحل
۱۱.....	۲-۴-۱. مزرعه‌ی باد فراساحل
۱۳.....	۵-۱. اثرات محیطی توربین‌های بادی
۱۳.....	۶-۱. اثر دنباله
۱۴.....	۱-۶-۱. تاثیر پیکربندی مزرعه بر کاهش اثرات نامطلوب دنباله
۱۵.....	۷-۱. ابزار بررسی میدان جریان و میدان دنباله
۱۶.....	۱-۷-۱. پیکربندی LES
۱۷.....	۲-۷-۱. چشم‌انداز LES
۱۷.....	۸-۱. مطالعه‌ی حاضر
۱۹.....	فصل دوم - مطالعات انجام شده.....
۴۴.....	فصل سوم - معادلات حاکم

- ۳-۱. کمیت‌گذاری اثر دنباله ۴۵
- ۳-۲. مدل دنباله ۴۶
- ۳-۲-۱. دنباله‌ی پشت یک توربین باد ایده‌آل شده ۴۶
- ۳-۲-۲. مدل دنباله‌ی منفرد ۴۸
- ۳-۲-۳. مدل دنباله‌ی چندلایه ۵۰
- ۳-۲-۴. ترکیب دنباله ۵۱
- ۳-۳. معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس ۵۲
- ۳-۴. چهارچوب شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES) ۵۳
- ۳-۴-۱. تابع فیلتر گوسی ۵۳
- ۳-۴-۲. تابع فیلتر کلاه استوانه‌ای ۵۴
- ۳-۴-۳. تابع فیلتر قطع‌کننده‌ی سریع (برشی تیز) ۵۴
- ۳-۵. معادلات پایه‌ی LES ۵۵
- ۳-۵-۱. مدل‌های استفاده شده در LES ۵۶
- ۳-۵-۲. مدل جنسن ۵۶
- ۳-۵-۳. مدل اسماغورینسکی ۵۷
- ۳-۵-۴. مدل دینامیک استاندارد ۵۸
- ۳-۵-۵. مدل دینامیک وابسته به مقیاس ۵۹
- ۳-۵-۶. مدل اسماغورینسکی-لیلی ۶۰
- ۳-۶. محاسبه‌ی توان خروجی کلی ۶۱
- فصل چهارم - شبیه‌سازی عددی ۶۲
- ۴-۱. مقدمه ۶۳
- ۴-۲. شبیه‌سازی میدان جریان مورد ۱ (زاویه‌ی انحراف صفر برای توربین بالادست) ۶۵

- ۶۷ ۱-۲-۴. شرایط مرزی و تنظیمات حل مورد ۱
- ۷۰ ۲-۲-۴. هزینه‌ی محاسباتی
- ۷۲ ۳-۲-۴. نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۱
- ۷۲ ۱-۳-۲-۴. شبکه‌بندی متوسط
- ۷۷ ۲-۳-۲-۴. شبکه‌بندی ریز
- ۸۰ ۳-۳-۲-۴. شبکه‌بندی خیلی ریز
- ۴-۲-۴. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده توسط سه شبکه‌بندی متوسط، ریز و خیلی ریز برای
مورد ۱ ۸۴
- ۳-۴. شبیه‌سازی میدان جریان مورد ۲ (زاویه‌ی انحراف ۱۰ درجه برای توربین بالادست) ۸۷
- ۱-۳-۴. شرایط مرزی و تنظیمات حل مورد ۲ ۸۷
- ۲-۳-۴. نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۲ ۸۷
- ۴-۴. شبیه‌سازی میدان جریان مورد ۳ (زاویه‌ی انحراف ۲۰ درجه برای توربین بالادست) ۹۰
- ۱-۴-۴. شرایط مرزی و تنظیمات حل مورد ۳ ۹۰
- ۲-۴-۴. نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۳ ۹۱
- ۵-۴. شبیه‌سازی میدان جریان مورد ۴ (زاویه‌ی انحراف ۳۰ درجه برای توربین بالادست) ۹۴
- ۱-۵-۴. شرایط مرزی و تنظیمات حل مورد ۴ ۹۴
- ۲-۵-۴. نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۴ ۹۴
- ۶-۴. محاسبه‌ی توان خروجی ۹۷
- ۱-۶-۴. بررسی کاهش تولید توان توربین باد بالادست برای موارد ۱ تا ۴ ۹۷
- ۱-۲-۶-۴. بررسی افزایش تولید توان توربین باد پائین‌دست برای موارد ۱ تا ۴ در فاصله‌ی ۵ برابری
قطر روتور نسبت به توربین باد بالادست ۹۸

۴-۶-۲-۲. بررسی افزایش تولید توان توربین باد پائین دست برای موارد ۱ تا ۴ در فاصله‌ی ۱۰ برابری	۹۹
۴-۶-۳. حد بالای زاویه‌ی انحراف توربین بالادست	۱۰۰
فصل پنجم - جمع‌بندی و پیشنهادهای	۱۰۲
۵-۱. نتایج شبیه‌سازی‌ها	۱۰۳
۵-۱-۱. مدل توربین باد منحرف نشده (زاویه‌ی انحراف صفر)	۱۰۳
۵-۱-۲. مدل توربین باد منحرف شده تحت زاویه‌ی انحراف ۱۰ درجه	۱۰۳
۵-۱-۳. مدل توربین باد منحرف شده تحت زاویه‌ی انحراف ۲۰ درجه	۱۰۴
۵-۱-۴. مدل توربین باد منحرف شده تحت زاویه‌ی انحراف ۳۰ درجه	۱۰۴
۵-۱-۵. حداکثر زاویه‌ی انحراف توربین بالادست	۱۰۵
۵-۱-۶. جمع‌بندی نتایج	۱۰۵
۵-۲. پیشنهادهای	۱۰۶
مراجع	۱۰۸

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱. ظرفیت جهانی توان الکتریکی استحصال شده از باد ۲۰۱۵-۱۹۹۰ (GW)
۴	شکل ۱-۲. نرخ رشد تولید توان الکتریکی از باد در پنج کشور چین، ایلات متحده، آلمان، اسپانیا و هند (MW)
۶	شکل ۱-۳. توزیع کیفی سرعت باد در مناطق مختلف ایران
۷	شکل ۱-۴. روند استحصال انرژی باد در ایران مابین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ میلادی
۱۰	شکل ۱-۵. مزرعه‌ی باد فرساحل (منجیل)
۱۰	شکل ۱-۶. مزرعه‌ی باد فراساحل

- شکل ۱-۷. نصب توربین‌های بادی شناور (از چپ به راست: ثابت شون‌دگی توسط کیسه‌ی شن، ثابت شون‌دگی به وسیله‌ی ریسمان لنگری، ثابت شون‌دگی به وسیله‌ی پی‌های شناور) ۱۲
- شکل ۱-۲. نمایه‌ی سرعت با مقدار ورودی ۱۱/۵۲ متربرثانیه ۲۲
- شکل ۲-۲. منحنی‌های متعلق به سرعت متوسط شده‌ی زمانی $(\bar{u} \frac{m}{s})$. a: اندازه‌گیری‌های تونل باد. b: مدل صفحه‌ی چرخان بدون گردش. c: مدل صفحه‌ی چرخان با گردش. d: مدل خط چرخان ۲۳
- شکل ۲-۳. تاثیر وجود توربین بر نمایه‌ی سرعت پائین‌دست ۲۴
- شکل ۲-۴. منحنی‌های توان مربوط به توربین باد پائین‌دست مربوط به دو فاصله‌ی جدائی ۳ و ۵ ۲۵
- شکل ۲-۵. حداکثر شدت آشفستگی در ناحیه‌ی دنباله در جهت پائین دست ۲۶
- شکل ۲-۶. استفاده از دو روش آزمایشگاهی و عددی برای تحلیل میدان جریان اطراف یک تپه‌ی منفرد. a: روش دوبعدی با استفاده از تکنیک دود. b: روش دوبعدی با استفاده از RIAM-COMPACT. c: روش سه‌بعدی با استفاده از تکنیک دود. d: روش سه‌بعدی با استفاده از RIAM-COMPACT ۲۸
- شکل ۲-۷. مزرعه‌ی توربین باد مورد مطالعه، واقع در شهر گاکوشیما ۲۸
- شکل ۲-۸. وابستگی ضریب دینامیک (C_D) به z/Δ لوزی: $۱۶ \times ۱۶ \times ۱۶$. مثلث: $۲۴ \times ۲۴ \times ۲۴$. مربع: $۳۶ \times ۳۶ \times ۳۶$. دایره: $۵۴ \times ۵۴ \times ۵۴$ ۳۰
- شکل ۲-۹. نقشه‌ی گرداب‌های تشکیل شده در پشت توربین مدل. a: با استفاده از روش PIV. b: با استفاده از روش ROVLM ۳۲
- شکل ۲-۱۰. ضریب برا مربوط به تیغه‌های مورد مطالعه در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ بر حسب زاویه‌ی حمله ۳۴
- شکل ۲-۱۱. اثر نزدیکی بستر دریا به توربین بر افزایش دنباله‌ی توربین ۳۵

- شکل ۲-۱۲. پروفیل‌های سرعت در جهت جریان: دایره: نتایج تجربی، خط-نقطه: مدل $k-\epsilon$ خط پر: مدل LES ۳۶
- شکل ۲-۱۳. پروفیل‌های سرعت محوری در صفحه‌ی عمودی در پائین‌دست توربین باد. الف) سرعت جریان آزاد باد وزنده ۵ متر بر ثانیه ب) سرعت جریان آزاد باد وزنده ۱۵ متر بر ثانیه ۳۸
- شکل ۲-۱۴. منحنی‌های سرعت محوری در جهت جریان (X) در امتداد پائین‌دست ۳۹
- شکل ۲-۱۵. توان تولیدی توسط سه تیغه با نوک‌های متفاوت در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ۴۰
- شکل ۲-۱۶. شکل شماتیک تونل و توربین باد مورد استفاده قرار گرفته توسط ژانگ و همکاران ۴۲
- شکل ۲-۱۷. پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده در فواصل معینی در پائین‌دست توربین باد ۴۲
- شکل ۳-۱. تغییرات ضریب دنباله برحسب تعداد توربین‌های نصب شده در یک مساحت ثابت ۴۶
- شکل ۳-۲. جریان هوای نزدیک یک توربین ایده‌آل: سرعت و فشار. از این مدل برای به‌دست آوردن معادلات کلیدی استفاده می‌شود ۴۸
- شکل ۳-۳. مدل دنباله‌ی جنسن، یک مدل دنباله‌ی منفرد ساده می‌باشد که گسترش مخروط دنباله را خطی فرض می‌کند ۵۰
- شکل ۳-۴. نحوه‌ی تحت تاثیر قرار گرفتن یک توربین به وسیله‌ی توربین‌های بالادست ۵۱
- شکل ۳-۵. جزئیات و پارامترهای مربوط به سایه‌اندازی جزئی. توربین پائین‌دست توسط قسمتی از مخروط دنباله‌ی توربین بالادست تحت تاثیر قرار گرفته است ۵۱
- شکل ۳-۶. طرح شماتیک طیف انرژی مربوط به روش LES ۵۷
- شکل ۴-۱. چگونگی انحراف توربین باد بالادست نسبت به باد وارد شونده (نما: از بالا) ۶۴
- شکل ۴-۲. مبدا مختصات انتخاب شده و طرح شماتیک تونل و توربین باد مدل شده ۶۷
- شکل ۴-۳. قلمرو محاسباتی در نظر گرفته شده و شرایط مرزی اعمال شده ۶۸
- شکل ۴-۴. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد-مورد ۱- شبکه‌بندی متوسط ۷۶

- شکل ۴-۵. نتایج آزمایشگاهی منحنی‌های بی‌بعد شده‌ی سرعت در دنباله‌ی توربین باد منحرف نشده..... ۷۶
- شکل ۴-۶. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد-مورد ۱- شبکه‌بندی ریز (بالا شبیه‌سازی عددی، پائین : نتایج آزمایشگاهی) ۷۹
- شکل ۴-۷. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد-مورد ۱- شبکه‌بندی خیلی ریز (بالا شبیه‌سازی عددی، پائین : نتایج آزمایشگاهی) ۸۳
- شکل ۴-۸. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد- مورد ۲..... ۸۹
- شکل ۴-۹. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد- مورد ۳..... ۹۳
- شکل ۴-۱۰. منحنی‌های بدست آمده مربوط به میدان سرعت در ناحیه‌ی دنباله‌ی توربین باد- مورد ۴..... ۹۶

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱. پنج کشور برتر جهان در زمینه‌ی تولید الکتریسیته از باد تا پایان سال ۲۰۱۰ (MW).....	۵
جدول ۱-۲. ظرفیت رایج و آتی ۵ مزرعه‌ی باد موجود در ایران	۸
جدول ۱-۳. مزارع باد خصوصی در حال احداث و ظرفیت آن‌ها در ایران	۹
جدول ۱-۴. رتبه‌بندی ده مزرعه‌ی باد بزرگ دنیا تا سال ۲۰۱۰	۱۱
جدول ۱-۵. برترین کشورهای تولید کننده‌ی الکتریسیته از انرژی باد فراساحل در اروپا تا سال ۲۰۱۰.....	۱۲
جدول ۴-۱. نامگذاری وضعیت‌های توربین باد بالادست منحرف شده بر حسب زاویه‌ی انحراف	۶۴

- جدول ۴-۲. شرایط مرزی اعمال شده به قلمرو حل ۶۹
- جدول ۴-۳. تنظیمات حل کننده ۶۹
- جدول ۴-۴. هزینه‌ی محاسباتی لازم برای اجرای شبیه‌سازی‌های موارد ۱ تا ۴ ۷۱
- جدول ۴-۵. مختصات مکانی نقاط A, B, C و D ۷۳
- جدول ۴-۶. سرعت نقاط A, B, C و D بر حسب زمان حل ۷۴
- جدول ۴-۷. مختصات مکانی نقاط E و G ۷۸
- جدول ۴-۸. سرعت نقاط E و G بر حسب زمان حل ۷۸
- جدول ۴-۹. مختصات مکانی نقاط I و K ۸۱
- جدول ۴-۱۰. سرعت نقاط I و K بر حسب زمان حل ۸۲
- جدول ۴-۱۱. مختصات مکانی نقاط M و O ۸۸
- جدول ۴-۱۲. سرعت نقاط M و O بر حسب زمان حل ۸۸
- جدول ۴-۱۳. مختصات مکانی نقاط Q و S ۹۱
- جدول ۴-۱۴. سرعت نقاط Q و S بر حسب زمان حل ۹۲
- جدول ۴-۱۵. مختصات مکانی نقاط U و W ۹۵
- جدول ۴-۱۶. سرعت نقاط U و W بر حسب زمان حل ۹۵
- جدول ۴-۱۷. کاهش تولید توان توربین باد بالادست منحرف شده بر اساس زاویه‌ی انحراف توربین ۹۸
- جدول ۴-۱۸. افزایش تولید توان توربین باد پائین دست نسبت به موارد انحرافی در فاصله‌ی ۵ برابری نصب ۹۹
- جدول ۴-۱۹. افزایش تولید توان توربین باد پائین دست نسبت به موارد انحرافی در فاصله‌ی ۱۰ برابری نصب ۱۰۰

فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۴-۱. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی متوسط در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$	۷۶
نمودار ۴-۲. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی متوسط در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=3$	۷۶
نمودار ۴-۳. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی متوسط در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=5$	۷۷
نمودار ۴-۴. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی متوسط در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=10$	۷۷
نمودار ۴-۵. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$	۸۰
نمودار ۴-۶. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=3$	۸۰
نمودار ۴-۷. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=5$	۸۰
نمودار ۴-۸. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=10$	۸۰
نمودار ۴-۹. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی خیلی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$	۸۳
نمودار ۴-۱۰. سرعت بی بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی خیلی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=3$	۸۳

- نمودار ۴-۱۱. سرعت بی‌بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی خیلی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=5$ ۸۴
- نمودار ۴-۱۲. سرعت بی‌بعد شده مورد ۱ با شبکه‌ی محاسباتی خیلی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=10$ ۸۴
- نمودار ۴-۱۳. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۱ با استفاده از سه شبکه بندی متوسط، ریز و خیلی ریز با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$ ۸۵
- نمودار ۴-۱۴. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۱ با استفاده از سه شبکه بندی متوسط، ریز و خیلی ریز با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=3$ ۸۵
- نمودار ۴-۱۵. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۱ با استفاده از سه شبکه بندی متوسط، ریز و خیلی ریز با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=5$ ۸۶
- نمودار ۴-۱۶. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده مربوط به مورد ۱ با استفاده از سه شبکه بندی متوسط، ریز و خیلی ریز با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=10$ ۸۶
- نمودار ۴-۱۷. سرعت بی‌بعد شده مورد ۲ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$ ۸۹
- نمودار ۴-۱۸. سرعت بی‌بعد شده مورد ۲ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=3$ ۸۹
- نمودار ۴-۱۹. سرعت بی‌بعد شده مورد ۲ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=5$ ۹۰
- نمودار ۴-۲۰. سرعت بی‌بعد شده مورد ۲ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=10$ ۹۰
- نمودار ۴-۲۱. سرعت بی‌بعد شده مورد ۳ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در $x/d=2$ ۹۳

نمودار ۴-۲۲. سرعت بی‌بعد شده مورد ۳ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۳..... $x/d=3$

نمودار ۴-۲۳. سرعت بی‌بعد شده مورد ۳ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۳..... $x/d=5$

نمودار ۴-۲۴. سرعت بی‌بعد شده مورد ۳ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۳..... $x/d=10$

نمودار ۴-۲۵. سرعت بی‌بعد شده مورد ۴ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۶..... $x/d=2$

نمودار ۴-۲۶. سرعت بی‌بعد شده مورد ۴ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۶..... $x/d=3$

نمودار ۴-۲۷. سرعت بی‌بعد شده مورد ۴ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۷..... $x/d=5$

نمودار ۴-۲۸. سرعت بی‌بعد شده مورد ۴ با شبکه‌ی محاسباتی ریز در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در

۹۷..... $x/d=10$

نمودار ۴-۲۹. چگونگی تغییرات تولید توان توربین‌ها بر حسب زاویه‌ی انحراف توربین

بالادست..... ۱۰۱

فصل اول

درآمد