

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

اندازه‌گیری جریان هوا در مکانیک سیالات تجربی

نویسنده:

دکتر محمدعلی اردکانی

دانشیار پژوهشکده مکانیک

سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

سرشناسه: اردکانی، محمدعلی، ۱۳۴۶ -

عنوان و نام پدیدآور: اندازه‌گیری جریان هوا در مکانیک سیالات تجربی/نویسنده محمدعلی اردکانی.

مشخصات نشر: تهران: نشر ایده‌نگار، ۱۳۹۴.

مشخصات ظاهری: ۳۴۰ ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۵۴۶۶-۷-۱

موضوع: سیالات - مکانیک

موضوع: جریان هوا - اندازه‌گیری

رده‌بندی دیویی: ۶۲۹/۱۳۲۳۲۳

رده‌بندی کنگره: ۸۱۳۹۴ الف ۴ الف / QA ۹۱۱

وضعیت فهرست‌نویسی: فیا

شماره کتابشناسی: ۴۱۴۹۰۲۵



..... نشر ایده‌نگار www.iNegar.ir

با همکاری سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

اندازه‌گیری جریان هوا در مکانیک سیالات تجربی

نویسنده: دکتر محمدعلی اردکانی

ویراستار ادبی: زهرا عشق‌آبادی

ناظر چاپ: منیر غریبی

صفحه‌آرایی: حدیث‌السادات حجازی

نوبت چاپ: اول، اسفند ۱۳۹۴

شمارگان: ۵۰۰

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۵۴۶۶-۷-۱

تکثیر تمام یا قسمتی از این اثر به هر شکل ممنوع است.

متخلفان به موجب قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

نشانی مرکز پخش: تهران، میدان فردوسی، خیابان ایرانشهر، پلاک ۱۶، طبقه سوم، واحد ۵

تلفن: ۲۱ و ۸۸ ۵۳ ۵۸ ۲۰ کدپستی: ۱۵۸۱۶۱۷۷۳۵ صندوق پستی: ۷۶۴۳-۱۴۱۵۵

مقدمه ناشر ۹/

پیش گفتار ۱۱/

فصل اول: اصول پایه مکانیک سیالات

۱-۱ اصول حرکت سیالات و معادله‌های آن ۱۶/

۱-۱-۱ قانون پیوستگی ۱۶/

۱-۱-۲ مقدار تکانه خطی ۱۷/

۱-۲ جریان در کانال‌های با سطح مقطع دایره ۱۹/

۱-۳ آنالیز ابعادی ۲۱/

۱-۴ گروه‌ها و ضرایب بی‌بعد مهم در مکانیک سیالات ۲۵/

۱-۵ تشابه جریان و چگایی استفاده از نتایج آزمایش ۲۷/

فصل دوم: اندازه‌گیری دما

۲-۱ انواع دماسنج ۳۳/

۲-۱-۱ دماسنج اتبساطی ۳۴/

۲-۱-۲ ترموکوپل ۳۵/

۲-۱-۳ دماسنج با سنسور مقاومتی دما، PTC و NTC ۳۶/

۲-۲ اندازه‌گیری دما به روش غیر تماسی ۴۰/

۲-۳ اندازه‌گیری نوسان‌های دمای جریان سیال ۴۱/

۲-۳-۱ پراب با سنسورهای سیم داغ ۴۱/

۲-۳-۲ استفاده از سنسور سیم سرد (مقاومتی) ۴۲/

۲-۳-۳ اندازه‌گیری همزمان سرعت و دما ۵۰/

فصل سوم: اندازه‌گیری فشار

۳-۱ اندازه‌گیری فشار استاتیکی ۵۵/

۳-۲ اندازه‌گیری فشار کلوفشار دینامیکی ۶۱/

۳-۳ خوانش فشار ۶۵/

۳-۳-۱ بارومتر ۶۶/

۳-۳-۲ مانومتر ۶۶/

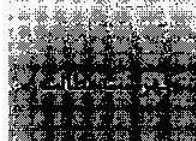
۳-۳-۳ مبدل الکترونیکی فشار ۷۰/

فصل چهارم: اندازه‌گیری سرعت

- ۴-۱ لوله استاتیکی پیتو ۷۶/
- ۴-۲ سرعت‌سنج لیزری (LDA) ۸۱/
- ۴-۳ سرعت‌سنج فنجان‌ی و پروانه‌ای ۸۳/
- ۴-۴ اندازه‌گیری جهت جریان هوا ۸۵/
 - ۴-۴-۱ کاوشگر پنج حفره‌ای ۸۵/
 - ۴-۴-۲ زاویه‌سنج جریان ۸۷/
- ۴-۵ اندازه‌گیری توزیع سرعت ۸۹/
- ۴-۶ مکانیزم انتقال‌دهنده ۹۰/

فصل پنجم: اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای

- ۵-۱ تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای جریان هوا ۹۶/
 - ۵-۱-۱ تجزیه و تحلیل آری ۹۶/
 - ۵-۱-۲ تجزیه و تحلیل زمانی ۹۷/
- ۵-۲ دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ۹۸/
- ۵-۳ اصول عملکرد دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ۱۰۰/
 - ۵-۳-۱ انتقال حرارت از سنسور ۱۰۲/
 - ۵-۴ اجزای دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ۱۰۳/
 - ۵-۴-۱ پراب سیم داغ/فیلم داغ ۱۰۴/
 - ۵-۴-۲ مدار الکترونیکی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ۱۱۱/
 - ۵-۵ کالیبره کردن ۱۱۳/
- ۵-۵-۱ کالیبراسیون جریان‌های دوبعدی ۱۲۳/
- ۵-۵-۲ کالیبراسیون جریان‌های سه‌بعدی ۱۲۵/
- ۵-۶ پاسخ فرکانسی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ۱۲۶/
 - ۵-۶-۱ پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ ۱۲۷/
 - ۵-۶-۲ پاسخ فرکانسی جریان‌سنج سیم داغ ۱۲۸/
 - ۵-۷ اثر دما بر پاسخ جریان‌سنج سیم داغ ۱۲۹/
 - ۵-۷-۱ روش‌های کاهش اثر دما بر اندازه‌گیری سرعت جریان هوا ۱۳۱/
 - ۵-۸ اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان هوا ۱۳۵/
 - ۵-۸-۱ اندازه‌گیری جریان هوا یک‌بعدی ۱۳۶/
 - ۵-۸-۲ اندازه‌گیری جریان هوا دوبعدی ۱۳۷/



۳-۵- اندازه گیری جریان هوای سه بعدی / ۱۴۰/

۹-۵- اندازه گیری جریان های معکوس / ۱۴۲/

۱-۹-۵- سنسورهای تحت تأثیر مانع / ۱۴۳/

۲-۹-۵- پراب سنسورهای موازی فیلم داغ / ۱۴۵/

فصل ششم: اندازه گیری دبی جریان هوا

۱-۶- اندازه گیری دبی جریان هوا با استفاده از سرعت متوسط / ۱۴۹/

۲-۶- دبی سنج های با عملکرد تفاضلی / ۱۵۴/

۱-۲-۶- دبی سنج تفاضلی با صفحه اوریفیس / ۱۵۷/

۲-۲-۶- دبی سنج تفاضلی با استفاده از نازل / ۱۶۱/

۳-۲-۶- دبی سنج تفاضلی با استفاده از ونتوری / ۱۶۵/

۳-۶- دبی سنج های با عملکرد خطی / ۱۶۶/

۱-۳-۶- دبی سنج تفاضلی از نوع دیافراگم / ۱۶۱/

۲-۳-۶- دبی سنج گردابه ای / ۱۶۷/

۴-۶- دبی سنج های غیر خطی / ۱۷۲/

۱-۴-۶- ویژگی های دبی سنج از نوع سیم داغ / ۱۷۳/

۲-۴-۶- اجزای تشکیل دهنده دبی سنج سیم داغ / ۱۷۴/

۵-۶- صحت سنجی دبی سنج سیم داغ / فیلم داغ در محل / ۱۸۰/

فصل هفتم: اندازه گیری نیرو و گشتاور

۱-۷- اصول عملکرد بالانس داخلی / ۱۸۶/

۱-۱-۷- المان های اندازه گیر نیروی محوری / ۱۸۷/

۲-۱-۷- المان های اندازه گیری نیروی عمودی و گشتاور پیچشی / ۱۸۸/

۳-۱-۷- المان های اندازه گیر گشتاور چرخشی / ۱۹۰/

۲-۷- اندازه گیری تغییر طول / ۱۹۰/

۳-۷- کالیبراسیون بالانس / ۱۹۴/

۱-۳-۷- بسترآزمون و روش کالیبراسیون / ۱۹۶/

۲-۳-۷- روش کالیبراسیون / ۱۹۸/

۴-۷- اندازه گیری نیرو با استفاده از بالانس / ۲۰۱/

فصل هشتم: کاربرد نرم افزار LabView در تحقیقات تجربی

- ۸-۱ جمع آوری و دریافت داده ها / ۲۰۶
- ۸-۱-۱ ارتباط به وسیله کارت DAQ / ۲۰۷
- ۸-۲ نرم افزار اندازه گیری سرعت لحظه ای جریان هوا / ۲۰۸
 - ۸-۲-۱ پنجره اصلی نرم افزار / ۲۰۸
 - ۸-۲-۲ نحوه ایجاد پنجره اصلی نرم افزار / ۲۱۰
- ۸-۳ کالیبره کردن سرعت جریان سنج سیم داغ / ۲۱۲
 - ۸-۳-۱ کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ با استفاده از تونل باد / ۲۱۵
 - ۸-۳-۲ برازش منحنی (Curve Fitting) / ۲۱۸
 - ۸-۳-۳ نحوه ایجاد نرم افزار کالیبره کردن / ۲۱۸
 - ۸-۳-۴ نحوه ایجاد نرم افزار کالیبراسیون با استفاده از تونل باد / ۲۲۱
 - ۸-۳-۵ برازش منحنی / ۲۱۱
- ۸-۴ انجام آزمایش سیم داغ / ۲۲۱
- ۸-۵ مکانیزم انتقال دهنده / ۲۳۱
- ۸-۶ انجام آزمایش خودکار / ۲۳۷

فصل نهم: بسترهای آزمون

- ۹-۱ تونل باد / ۲۳۹
 - ۹-۱-۱ آزمایش های تونل باد / ۲۳۹
 - ۹-۱-۲ انواع تونل باد / ۲۴۲
 - ۹-۱-۳ اجزای تونل باد / ۲۴۶
 - ۹-۱-۴ تونل بادهای ویژه / ۲۴۷
- ۹-۲ بسترهای آزمون فن / ۲۴۹
 - ۹-۲-۱ بستر آزمون با کانال ورودی / ۲۵۰
 - ۹-۲-۲ بستر آزمون با محفظه خروجی / ۲۵۳
 - ۹-۳ بستر کالیبراسیون دبی سنج ها / ۲۵۵
 - ۹-۴ بسترهای آزمون خاص / ۲۵۷
- ۹-۴-۱ بستر آزمون عملکرد فن و رادیاتور خودرو / ۲۵۷
- ۹-۴-۲ بستر سیلندر- پیستون / ۲۶۱

فصل دهم: طراحی آزمایش و بررسی نتایج

۱۰-۱ جریان داخلی / ۲۶۵

۱۰-۱-۱ دیفیوژر / ۲۶۵

۱۰-۱-۲ نازل / ۲۷۱

۱۰-۱-۳ توری / ۲۷۵

۱۰-۱-۴ لانه زنبوری / ۲۷۸

۱۰-۲ جریان خارجی / ۲۸۰

۱۰-۲-۱ جریان حول استوانه / ۲۸۰

۱۰-۲-۳ ایرفویل / ۲۸۷

۱۰-۲-۴ اندازه گیری ریزش گردابه‌ها / ۲۸۹

۱۰-۳ لایه مرزی / ۲۹۳

۱۰-۳-۱ لایه مرزی آرام روی صفحه تخت / ۲۹۳

۱۰-۳-۲ لایه مرزی گذرا بر روی صفحه تخت / ۲۹۸

۱۰-۳-۳ لایه مرزی گذرا روی منحنی تخت دشی از زیری / ۳۰۴

۱۰-۳-۴ لایه مرزی درهم بر صفحه تخت / ۳۰۷

واژه‌نامه لاتین / ۳۲۱

فهرست راهنما / ۳۲۷

فهرست منابع / ۳۳۳



به نام خدا

مقدمه ناشر

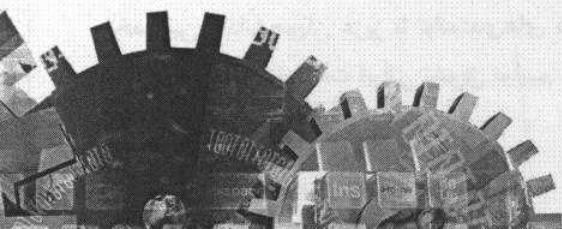
ما معتقدیم توجه به شرایط کنونی کشور عزیزمان، باید اولویت کارهای پژوهشی و انتشار مقالات و کتابهای علمی با موضوعاتی باشد که بتواند بخشی از نیازهای جامعه ایرانی را برطرف سازد و حاصل آن را نهادهای به صورت عینی در جهت کاستن از حلقه‌های زنجیرهای کهنه و قطور وابستگی به بیگانگان باشد. حالی که متأسفانه شاهدیم، در سال‌های اخیر بسیاری از کارهای پژوهشی انجام شده و مقالات منتشر شده در مجلات و سایت‌های خارجی به هیچ عنوان در این راستا نبوده‌اند. لذا ما و مجموع همکارانمان در نشر ایده‌نگار، هدف خود را انتشار و حمایت از آثاری قرار داده‌ایم که علاوه بر اینکه دانش سرچشمی نمودن علوم و تکنولوژی‌های نوین باشد، با قرار گرفتن در زنجیره تولید علم، پاسخگوی بخشی از نیازهای علمی جامعه صنعتی کشور باشد تا افق استقلال میهن عزیزمان را با پیشرفت‌های بنیادین علمی و صنعتی شاهد باشیم. در راستای این هدف بلند و با امضای توافقنامه همکاری مشترک با سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران در حوزه نشر کتب مرجع و برگزاری کارگاه‌های آموزشی مرتبط، می‌دوایم با یاری متخصصین این سازمان، آثار ارزشمندی منتشر نماییم که در حوزه خود قابل ارجاء باشند. کتاب حاضر از جمله آثاری است که در این راستا تهیه و در اختیار شما سروران گرامی قرار گرفته است. در اینجا لازم می‌دانیم از آقای دکتر اردکانی مؤلف این کتاب که با کار مستمر پژوهشی توانسته این پروژه را به نحو شایسته‌ای به اتمام برسانند سپاسگزاری نماییم. بی‌شک اگر پشتوانه خوب علمی و تجارب بسیار گرانقدر ایشان در حوزه اندازه‌گیری جریان هوا نبود امکان تولید این اثر جامع وجود نداشت.

ما از ابتدا یکی از اهداف اصلی خود را در نشر ایده‌نگار، معرفی تولیدات فاخر ایرانی و شرکت‌های برتر در زمینه ارائه خدمات نوین صنعتی در کتاب‌های مرتبط قرار دادیم تا ضمن آشنا نمودن متخصصین و دانشجویان عزیز با توانمندی‌های داخلی، جامعه صنعتی کشور را به استفاده هرچه بیشتر از خدمات و تولیدات ایرانی تشویق نماییم و در کنار سایر هم‌میهنان خود، نقشی شایسته در

راهاندازی جنبش ارج نهادن به تولید، دانش و توانمندی‌های بومی کشور ایفا نماییم. لذا بدین‌وسیله از شرکت‌های برتر تولید کننده و ارائه دهنده خدمات نوین علمی و صنعتی دعوت می‌نماییم تا با حمایت از انتشار چنین آثاری ضمن معرفی برند خود به جامعه صنعتی کشور و سازمان‌های دولتی، بازار خود را نیز در رقابت با تولیدات خارجی به شکل پایداری توسعه دهند. همچنین مدیران سازمان‌های مختلف می‌توانند با حمایت از این گونه آثار، نیازهای آموزشی مجموعه تحت سرپرستی خود را به شکلی مناسب تامین نمایند. نشر ایده‌نگار دست تمامی این عزیزان را برای همکاری می‌فشارد. در پایان از ریاست محترم سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران و اعضای محترم کمیته انتشارات، خصوصاً سرکار خانم عشق آبادی که از نشر این اثر حمایت نمودند سپاسگزاری می‌نماییم. امید است سربلندی ایران و همه ایرانیان

سعید غریبی - هادی غریبی

نشر ایده‌نگار



پیش گفتار

هدف از اندازه‌گیری جریان هوا، بررسی و کنترل آن در فرایندهای مهندسی و همچنین پژوهش در زمینه مکانیک سیالات است. پژوهش تجربی در مکانیک سیالات را می‌توان به دو صورت آزمایشگاهی و یا میدانی انجام داد. در پژوهش‌های آزمایشگاهی، با استفاده از بستر آزمون جریان هوا ایجاد و آزمایش‌های لازم انجام می‌شود. به‌عنوان مثال با استفاده از تونل باد جریان قابل کنترلی به وجود می‌آید و جریان هوای اطراف مدل، اندازه‌گیری و بررسی می‌شود. در پژوهش‌های میدانی نیز جریان هوا در اطراف جسم واقعی اندازه‌گیری و بررسی می‌شود. به‌عنوان نمونه، به‌منظور به‌دست آوردن داده‌های پژوهشی مناسب، نیاز است که اندازه‌گیری جریان اطراف برج خنک‌کننده خشک هلو، به‌طور صحیح انجام پذیرد. اینجانب با توجه به تجربه خویش در انجام طرح‌های متعدد پژوهشی و نیمه صنعتی در زمینه اندازه‌گیری جریان هوا، وظیفه خود دانستم که دانش اندک خود را برای استفاده دانشجویان، پژوهشگران و مهندسان به‌صورت تألیف کتاب حاضر درآورم.

کتاب "اندازه‌گیری جریان هوا" مکانیک سیالات تجربی" شامل ۱۰ فصل است. فصل اول شامل اصول پایه مکانیک سیالات و آنالیز ابعادی بوده به بحث گروه‌ها و ضرایب بی‌بعد مهم در مکانیک سیالات نیز پرداخته شده است. فصل دوم به اندازه‌گیری دما اختصاص دارد. در این فصل انواع دماسنج‌های تماسی معرفی و در مورد اندازه‌گیری پیچیده نوسان دما، بحث شده است. موضوع فصل سوم، اندازه‌گیری فشار استاتیکی، کل و دینامیکی است. همچنین در مورد تجهیزات اندازه‌گیری فشار نیز در این فصل بحث شده است. در فصل چهارم، به اندازه‌گیری سرعت متوسط پرداخته شده و انواع سرعت‌سنج‌ها و روش اندازه‌گیری جهت جریان هوا مورد بحث قرار گرفته است. اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای، به‌خصوص برای جریان‌های مغشوش اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق جریان مغشوش، جریان‌سنج سیم داغ است که به‌طور مبسوط در فصل پنجم مورد بحث قرار می‌گیرد. فصل ششم با اندازه‌گیری دبی جریان هوا ارتباط دارد. با توجه به کاربرد فراوان اندازه‌گیری دبی هوا در صنعت، در این فصل روش‌های مختلف اندازه‌گیری دبی جریان هوا مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. فصل هفتم اندازه‌گیری نیرو و گشتاورهای اعمالی را بر مدلی که در جریان هوا قرار گرفته، توضیح می‌دهد. معمولاً نیروهای اعمالی بر مدل توسط بالانس اندازه‌گیری می‌شود.

در حال حاضر به منظور انجام سریع و ساده تر پژوهش ها، از رایانه استفاده می شود. جمع آوری و دریافت داده ها توسط رایانه، تجزیه و تحلیل داده ها توسط نرم افزار در فصل هشتم بیان گردیده و نحوه نوشتن نرم افزار LabVIEW برای کاربردهای سیالاتی توضیح داده شده است. برای انجام پژوهش نیاز به بستر آزمون بوده که انواع بستر آزمون نظیر تونل باد، بستر آزمون، بستر کالیبراسیون دبی سنج ها در فصل نهم ارائه شده است. روش انجام آزمایش، در پژوهش های تجربی از اهمیت زیادی برخوردار است. در فصل دهم، روش های آزمایش و بررسی نتایج آن برای جریان های داخلی مانند دیفیوزر و برای جریان های خارجی نظیر ایرفویل مورد بحث و بررسی قرار گرفته و روش آزمایش در لایه مرزی نیز توضیح داده شده است.

در انتها لازم می آید از مدیران مسئولان و همکاران گرامی در سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران که با حمایت های خود، این کتاب را در انجام طرح های پژوهشی و نیمه صنعتی، همچنین تألیف این کتاب یاری نموده اند تشکر نه ایم. همچنین از سرکار خانم مهندس حجازی برای تنظیم و صفحه آرایی کتاب و انجام هماهنگی های لازم، تشکر و قدردانی می شود. از سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران و انتشارات ایده نگار نیز بابت همکاری و نشر این کتاب کمال تشکر را دارم. با توجه به این که این اثر، خالی از ایراد نیست، از استادان محترم دانشگاه ها، دانشجویان، پژوهشگران، مهندسان و خوانندگان گرامی خواهشمندم انتقادهای پیشنهادی خود را برای نگارنده ارسال نمایند.

و من ... توفیق

محمدعلی اردکانی