



انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۳۴۶

# احتراق

ج . وارناتز - یو . ماس - ر . دبلیو دی بل

مترجم  
دکتر محمد مقیمان

www.ketab.ir

Warnatz, J.

وارناتس

احتراق / ج. وارناتز، یو. ماس، ر. دبلیو دیبل؛ مترجم محمد مقیمان. - مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۱.

ISBN: 964-5782-76-7

۱۸۵۰۰ ریال

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

Technische

عنوان اصلی:

verbrennung = combustion: Physical and chemical

fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation.

واژه‌نامه.

Maas, Ulrich ، ب. دیبل، روبرت

۱. احتراق الف. ماس، اولریش، ۱۹۵۹ -

، مترجم. د. دانشگاه فردوسی مشهد.

Dibble, Robert W. ج. مقیمان، محمد، ۱۳۳۰ -

ه. عنوان.

۵۴۱/۳۶۱

۳ الف ۲ و / OD ۵۱۶

۱۳۸۱

م ۸۱-۲۹۵۳۶

کتابخانه ملی ایران



سازمان اسناد و کتابخانه ملی

انتشارات، شماره ۳۴۶

احتراق

تألیف

ج. وارناتز - یو. ماس - ار. دبلیو. دیبل

ترجمه

دکتر محمد مقیمان

وزیری، ۴۱۶ صفحه، ۱۰۰۰ نسخه، چاپ دوم، بهار ۱۳۸۷

امور فنی و چاپ: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی

بها: ۲۹۰۰۰ ریال

## فهرست مطالب

۷	پیشگفتار مترجم
۹	پیشگفتار مؤلفان
۱۱	فصل اول - مقدمه، تعاریف و پدیده‌های اساسی
۱۱	۱-۱: مقدمه
۱۲	۱-۲: بعضی تعاریف اساسی
۱۵	۱-۳: انواع شعله‌های اساسی
۲۲	۱-۴: تمرینها
۲۳	فصل دوم - بررسی آزمایشگاهی شعله‌ها
۲۴	۲-۱: اندازه‌گیری سرعت
۲۶	۲-۲: اندازه‌گیری چگالی جرم
۲۸	۲-۳: اندازه‌گیری غلظت
۳۶	۲-۴: اندازه‌گیری دما
۳۸	۲-۵: اندازه‌گیری فشار
۳۹	۲-۶: اندازه‌گیری اندازه ذرات
۴۰	۲-۷: بازرسیهای همزمان
	۲-۸: تمرینها
۴۳	فصل سوم - تشریح ریاضی شعله‌های پیش‌آمیخته تخت آرام
۴۴	۳-۱: معادلات پایستگی برای شعله‌های پیش‌آمیخته تخت آرام
۴۸	۳-۲: انتقال گرما و جرم
۴۹	۳-۳: تشریح جبهه شعله پیش‌آمیخته تخت آرام
۵۶	۳-۴: تمرینها
۵۷	فصل چهارم - ترمودینامیک فرایندهای احتراق
۵۸	۴-۱: قانون اول ترمودینامیک
۶۰	۴-۲: انتالپهای استاندارد تشکیل

- ۶۲ ۴-۳: ظرفیتهای گرمایی
- ۶۵ ۴-۴: قانون دوم ترمودینامیک
- ۶۶ ۴-۵: قانون سوم ترمودینامیک
- ۶۷ ۴-۶: معیار تعادل و جداول ترمودینامیک
- ۶۸ ۴-۷: تعادل در آمیزه‌های گاز، پتانسیل شیمیایی
- ۷۰ ۴-۸: تعیین ترکیبات تعادلی در گازها
- ۷۴ ۴-۹: تعیین دماهای شعله بی‌دررو
- ۷۵ ۴-۱۰: جدول‌بندی داده‌های ترمودینامیکی
- ۷۹ ۴-۱۱: تمرینها

### ۸۱ فصل پنجم - پدیده‌های ترابری

- ۸۱ ۱-۵: یک مدل فیزیکی ساده برای فرایندهای ترابری
- ۸۵ ۵-۲: هدایت حرارت در گازها
- ۸۸ ۵-۳: گرانروی گازها
- ۹۰ ۵-۴: پخش در گازها
- ۹۲ ۵-۵: پخش حرارتی، اثر دفور و پخش فشاری
- ۹۳ ۵-۶: مقایسه با نتایج آزمایشگاهی
- ۹۸ ۵-۷: تمرینها

۱۰۱

### فصل ششم - سینتیکهای شیمیایی

- ۱۰۱ ۶-۱: قوانین سرعت و درجه‌های واکنش
- ۱۰۳ ۶-۲: رابطه واکنشهای رفت و برگشت
- ۱۰۴ ۶-۳: واکنشهای بنیادی، مولکولارینه واکنش
- ۱۱۱ ۶-۴: بررسی آزمایشگاهی واکنشهای بنیادی
- ۱۱۲ ۶-۵: وابستگی به دمای ضرایب سرعت
- ۱۱۵ ۶-۶: وابستگی به فشار ضرایب سرعت
- ۱۱۹ ۶-۷: واکنشهای سطحی
- ۱۲۵ ۶-۸: تمرینها

### ۱۲۷ فصل هفتم - سازوکارهای واکنش

- ۱۲۸ ۷-۱: مشخصه‌های سازوکارهای واکنش
- ۱۲۸ ۷-۱-۱: حالت‌های شبه پایا

۱۳۱	۷-۱-۲: تعادل جزئی
۱۳۴	۷-۲: تحلیل سازوکارهای واکنش
۱۳۴	۷-۲-۱: تحلیل حساسیت
۱۳۹	۷-۲-۲: تحلیل جریان واکنشی
۱۴۲	۷-۲-۳: تحلیل ویژه - مقدار سیستمهای واکنش شیمیایی
۱۴۷	۷-۳: ناسلیسی دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی
۱۴۸	۷-۴: ساده سازی سازوکارهای واکنش
۱۵۵	۷-۵: واکنشهای زنجیری رادیکالی
۱۵۸	۷-۶: تمرینها

### فصل هشتم - شعله‌های پیش آمیخته آرام

۱۶۱	۸-۱: تحلیل زلدوویچ برای انتشار شعله
۱۶۲	۸-۲: حلهای عددی معادلات پایستگی
۱۶۳	۸-۲-۱: گسسته سازی فضایی
۱۶۴	۸-۲-۲: مقادیر اولیه، شرایط مرزی، جواب ساکن
۱۶۷	۸-۲-۳: روشهای حل صریح
۱۶۷	۸-۲-۴: روشهای حل ضمنی
۱۶۸	۸-۲-۵: حل نیمه - ضمنی معادلات دیفرانسیل جزئی
۱۶۹	۸-۲-۶: حل ضمنی معادلات دیفرانسیل جزئی
۱۷۰	۸-۲-۷: ساختارهای شعله
۱۷۲	۸-۴: سرعتهای شعله
۱۷۵	۸-۵: تحلیل حساسیت
۱۷۷	۸-۶: تمرینها

### فصل نهم - شعله‌های غیرپیش آمیخته آرام

۱۸۱	۹-۱: شعله‌های غیرپیش آمیخته جریان متقابل
۱۸۲	۹-۲: شعله‌های غیرپیش آمیخته جت آرام
۱۸۷	۹-۳: شعله‌های غیرپیش آمیخته با شیمی سریع
۱۸۹	۹-۴: تمرینها

### فصل دهم - فرایندهای فروزش

۱۹۵	۱۰-۱: تحلیل سمونوف انفجارهای گرمایی
۱۹۶	

۱۹۸	۱۰-۲: تحلیل فرانک - کامتسکی انفجارهای گرمایی
۲۰۰	۱۰-۳: خود افروزش: حدود افروزش
۲۰۴	۱۰-۴: خودافروزش: زمان دیرکرد افروزش
۲۰۶	۱۰-۵: افروزش القا شده، انرژیهای افروزش کمینه
۲۱۱	۱۰-۶: افروزش جرقه‌ای
۲۱۲	۱۰-۷: تراکها
۲۱۴	۱۰-۸: تمرینها

**فصل یازدهم - معادلات ناویر - استوکس برای جریانهای واکنشی سه‌بعدی**

۲۱۷	۱۱-۱: معادلات پایستگی
۲۱۷	۱۱-۱-۱: پایستگی جرم کلی
۲۱۹	۱۱-۱-۲: پایستگی جرم گونه
۲۱۹	۱۱-۱-۳: پایستگی اندازه حرکت
۲۲۰	۱۱-۱-۴: پایستگی انرژی
۲۲۱	۱۱-۲: قوانین تجربی
۲۲۲	۱۱-۲-۱: قانون نیوتون
۲۲۲	۱۱-۲-۲: قانون فوریه
۲۲۳	۱۱-۲-۳: قانون فیک و پخش گرمایی
۲۲۴	۱۱-۳: پیوست: بعضی تعاریف و قوانین از تحلیل برداری و تسوری
۲۲۵	۱۱-۴: تمرینها

**فصل دوازدهم - جریانهای واکنش کننده مغشوش**

۲۲۹	۱۲-۱: بعضی پدیده‌های اساسی
۲۳۰	۱۲-۲: شبیه‌سازی عددی مستقیم
۲۳۳	۱۲-۳: مفاهیم برای مدل‌سازی اغتشاش: توابع احتمال چگالی (PDF)
۲۳۵	۱۲-۴: مفاهیم برای مدل‌سازی اغتشاش: متوسط‌گیری زمانی و فاور
۲۳۶	۱۲-۵: معادلات پایستگی متوسط‌گیری شده
۲۳۹	۱۲-۶: مدل‌های اغتشاش
۲۴۱	۱۲-۷: سرعت‌های متوسط واکنش
۲۴۶	۱۲-۸: مدل‌های شکست گرداب
۲۵۴	۱۲-۹: شبیه‌سازی گرداب - بزرگ
۲۵۴	۱۲-۱۰: مقیاس‌های اغتشاش
۲۵۵	

۲۷۵	۱۲-۱۱ : تمرینها
۲۶۱	<b>فصل سیزدهم - شعله‌های غیرپیش‌آمیخته مغشوش</b>
۲۶۳	۱۳-۱ : شعله‌های غیرپیش‌آمیخته با شیمی تعادلی
۲۶۶	۱۳-۲ : شیمی سرعت محدود در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته
۲۷۲	۱۳-۳ : خاموشی شعله
۲۷۵	۱۳-۴ : شبیه‌سازی‌های PDF شعله‌های غیرپیش‌آمیخته مغشوش
۲۷۹	۱۳-۵ : تمرینها
۲۸۱	<b>فصل چهاردهم - شعله‌های پیش‌آمیخته مغشوش</b>
۲۸۲	۱۴-۱ : طبقه‌بندی شعله‌های پیش‌آمیخته مغشوش
۲۸۵	۱۴-۲ : مدل‌های شعله‌های کوچک آرام (فلیمت)
۲۸۸	۱۴-۳ : سرعت شعله مغشوش
۲۹۰	۱۴-۴ : خاموشی شعله
۲۹۴	۱۴-۵ : سایر مدل‌های احتراق پیش‌آمیخته مغشوش
۲۹۴	۱۴-۶ : تمرینها
۲۹۷	<b>فصل پانزدهم - احتراق سوخت‌های مایع و جامد</b>
۲۹۸	۱۵-۱ : احتراق قطره و افشانه (اسپری)
۲۹۹	۱۵-۱-۱ : احتراق قطرات منفرد
۳۰۴	۱۵-۱-۲ : احتراق افشانه‌ها
۳۱۰	۱۵-۲ : احتراق زغال‌سنگ
۳۱۴	۱۵-۳ : تمرینها
۳۱۵	<b>فصل شانزدهم - اکسیداسیون دما پائین، کوبش موتور</b>
۳۱۵	۱۶-۱ : پدیده‌های اساسی
۳۱۹	۱۶-۲ : اکسیداسیون دما-بالا
۳۲۱	۱۶-۳ : اکسیداسیون دما-پائین
۳۲۵	۱۶-۴ : خسارت‌های کوبش
۳۲۷	۱۶-۵ : تمرینها

۳۲۹	فصل هفدهم - تشکیل اکسیدهای ازت
۳۳۰	۱۷-۱: NO حرارتی (NO زلدوویج)
۳۳۴	۱۷-۲: NO فوری (NO فنیمور)
۳۳۷	۱۷-۳: تولید NO از طریق منواکسید دی نیتروژن
۳۳۷	۱۷-۴: تبدیل نیتروژن سوخت به NO
۳۴۳	۱۷-۵: کاهش NO به وسیله اصلاحات احتراقی
۳۴۷	۱۷-۶: احتراق کاتالیزوری
۳۴۹	۱۷-۷: کاهش NO به وسیله فرایندهای بعد از احتراق

۳۵۵	فصل هجدهم - تشکیل هیدروکربنها و دوده
۳۵۵	۱۸-۱: هیدروکربنهای نسوخته
۳۵۶	۱۸-۱-۱: خاموشی شعله به علت کشیدگی
۳۵۷	۱۸-۱-۲: خاموشی شعله در جداره ها و شکافها
۳۶۰	۱۸-۲: تشکیل هیدروکربنهای حلقوی چند حلقه ای (PAH)
۳۶۳	۱۸-۳: پدیده تشکیل دوده
۳۶۷	۱۸-۴: مدل سازی و شبیه سازی تشکیل دوده
۳۷۷	منابع
۳۹۳	فرهنگ لغات علمی
۴۰۹	واژه یاب فارسی



## پیش‌گفتار مترجم

گسترده‌گی و اهمیت احتراق سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی در صنعت، وسایل نقلیه و مصارف خانگی بر کسی پوشیده نیست. بیش از نود درصد انرژی مصرفی جهان و نزدیک به صد درصد انرژی مصرفی در ایران از احتراق سوخت‌های فسیلی تهیه می‌شود. نیاز فزاینده جهان به انرژی، محدود بودن و کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی این سوخت‌ها موجب شده است که طراحی و وسائل «احتراق تمیز» با بازده بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان سیستم‌های احتراقی قرار گیرد. انجام این امر نیاز به شناخت کامل پدیده پیچیده احتراق و به خدمت گرفتن روش‌های دقیق آزمایشگاهی و استفاده از روش‌های پیشرفته محاسباتی و شبیه‌سازی فرایندهای احتراق دارد. در این کتاب مؤلفان تلاش کرده‌اند ضمن بیان مفاهیم اساسی احتراق، خواننده را با روش‌های نوین اندازه‌گیری و همچنین مدل‌سازی فرایندهای احتراق آشنا نمایند.

کتاب در هجده فصل تهیه شده است. در هفت فصل اول موضوعات پایه از جمله تعاریف و قوانین پایه ترمودینامیک، پدیده‌های انتقال، سینتیک‌های شیمیایی و روش‌های مختلف اندازه‌گیری متغیرهای شرکت‌کننده در احتراق بیان شده است. هفت فصل بعد به معرفی و مدل‌سازی انواع شعله و همچنین فرایندهای آفروزش، تأخیر در آفروزش و ضربه، اختصاص یافته است. چهار فصل آخر، احتراق سوخت‌های مایع و جامد، احتراق در موتورها و تولید آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و دوده را تشریح و روش‌های مدل‌سازی آنها را بیان کرده است.

مترجم در ابتدا از شورای محترم انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر تصویب چاپ کتاب و از مسئولان پرتلاش مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه به ویژه جناب آقای فنایی که نهایت همکاری را داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نماید و بر خود فرض می‌داند از همکار محترم جناب آقای دکتر محمود موسوی که با وسواس علمی و دقت نظر خاص و قابل تحسین خود با

ویرایش علمی کتاب قبول زحمت فرموده‌اند و از جناب آقای مصطفی قندهاری در جهت تسریع در روند چاپ و ویرایش ادبی آن تشکر فراوان نماید. همچنین آقای مهندس علی فرهید در تمام مراحل برای تنظیم بخشهای مختلف، همکاریهای مؤثر رایانه‌ای داشته‌اند که بدین وسیله از زحمات ایشان تشکر می‌شود. زحمت حروف‌چینی و صفحه‌آرایی کتاب بر عهده سرکارخانم زهرا زواری بوده است که از ایشان نیز سپاسگزاری می‌شود.

در خاتمه متذکر می‌شود دریافت هرگونه تذکرات و نظریات خوانندگان محترم در ارتباط با لغزشهای احتمالی، مزید سپاسگزاری خواهد بود.

محمد مقیمان

شهریور ماه سال ۱۳۸۱

## پیش‌گفتار مؤلفان

این کتاب از جزوات مختلف درس احتراق دانشگاه اشتوتگارت (توسط ج و ارناتز) تهیه شده است. این جزوات که برای دانشجویان سال اول تحصیلات تکمیلی (و دانشجویان پیشرفته کارشناسی) تهیه شده بود اطلاعات پایه را در مورد احتراق شامل می‌شد. به چنین دوره‌ای نیاز بود، زیرا دانشجویان درس احتراق با اطلاعات قبلی متنوع از جمله: رشته‌های فیزیک، شیمی فیزیک، مهندسی مکانیک، علوم رایانه و ریاضیات، آترودینامیک و علوم جوی وارد این کلاس می‌شدند. بعد از چند سال توسعه و تکمیل جزوات چاپ و توزیع شده در بین دانشجویان، این جزوات به صورت کتاب مرتب شده، ابتدا به زبان آلمانی و سپس به زبان انگلیسی ترجمه و چاپ گردید؛ با توجه به این حقیقت که چاپ دوم کتاب فقط در طی دو سال به فروش رفت. کتاب حاضر که چاپ سوم زبان انگلیسی آن است، نسبت به چاپ قبل تنها شامل بعضی اصلاحات چاپی، نگارش و نمایاندن ظاهر فرمولها و اعداد است.

ما می‌خواهیم این کتاب کلیه اطلاعات پایه را برای سرآغاز شروع پژوهشها فراهم کند. بدین جهت تشریح بسیاری از مباحث کتاب با ذکر سابقه پژوهشهای انجام شده، همراه است. علاوه بر آن، با اطلاعات کتاب انتظار این است که مهندسان و پژوهشگران احتراق برای هدایت به سمت درک بیشتر، به‌طور کلی، و در جهت تولید وسایل احتراقی با بازده‌های بالاتر و نشر آلاینده‌های کمتر، بطور ویژه، در آینده به‌طور فزاینده‌ای به مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، اعتماد کنند. کدهای رایانه‌ای شعله آرام و داده‌های اجرای آنها در آدرس اینترنتی <http://reaflow.iwr.uni-heidelberg.de/software/> قابل دسترس می‌باشد. با توجه به این که این کتاب یک نقطه شروع جهت پژوهش است، انتظار داریم که در زمانهای متعارف به روز شود. از خوانندگان کتاب دعوت می‌کنیم از آدرس اینترنتی <http://www.me.berkeley.edu/cal/book/> در

*U.C. Berkely* برای بحثهای تکمیلی و تفاسیر سازنده که ممکن است بخشی از چاپ جدید کتاب باشد استفاده نمایند.

مانند زمینه تحصیلی دانشجویان ذکر شده در بالا، زمینه‌های تخصصی مؤلفان نیز متنوع می‌باشد، لذا لازم می‌دانند از افراد زیادی که نام آنها در متن کتاب ذکر می‌شود، قدردانی بسیار نمایند. ما در مورد قدردانی از یک مرکز دارای مشترکات زیاد می‌باشیم: ما تشکر خود را به همکارانمان در مرکز پژوهشهای احتراق در آزمایشگاههای ملی سان‌دیا در لیومور کالیفرنیا اظهار می‌کنیم، این مرکز برای ما تقاطع روشهای مفیدی بوده است و همکاری مداومی را برای اتمام این کتاب، به خصوص این چاپ سوم آن (به وارانتر) نموده است.

هیدلبرگ، اشتوتگارت؛ برکلی؛ اکتبر ۲۰۰۰، ج وارانتر؛ یوماس؛ ردلیو دی‌بل