

# مهندسی خلاء

(ویژه مهندسیین فرایند، مکانیک، معالوژی، ابزار دقیق و فیزیک)



# VACUUM ENGINEERING

مهندسی خلاء

تیمور رفیعی زاده

داوود محبوبی

الناز ابی اوغلی

مؤلف :

کارشناس ارشد مهندسی فرآیند

**تیمور رفیعی زاده**

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
(شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران)

**داوود محبوبی**

کارشناس مهندسی فرآیند

**الناز ابی اوغلی**



۱۳۵۹

واحد صنعتی امیرکبیر

Distribution Add :  
JIHAD AMIRKABIR University Publication Center,  
Next to Amirkabir University , Hafez Ave.,  
Tehran, IRAN  
Tel : +98 21 66465392  
Fax : +98 21 88895969

## فصل اول : مفاهیم و معادلات پایه در خلاء

- ۱-۱- معادله اصلی مهندسی خلاء ۱  
 ۲-۱- روابط کانداکتانس در خطوط موازی و سری ۳

## فصل دوم : تحلیل فیزیکی گازها در خلاء

- ۱-۲- فشار گاز ۵  
 ۲-۲- توزیع سرعت مولکولهای گاز ۷  
 ۳-۲- طول مسیر پویس آزاد متوسط (Mean free path length) ۱۰  
 ۴-۲- فعل و انفعال مولکولهای گاز با سطوح ۱۲  
 ۵-۲- زمان جذب سطحی (Adsorption Time) ۱۴  
 ۶-۲- فشار اشباع ۱۹  
 ۷-۲- پوشش سطح با مولکولهای گاز (Surface Coverage) ۲۳  
 ۸-۲- انحلال گاز در جامدات ۲۹  
 ۹-۲- پدیده‌های الکتریکی در خلاء ۳۲

## فصل سوم : پدیده های انتقال در خلاء

- ۱-۳- ضرائب انتقال در محدوده های مختلف خلاء ۳۹  
 ۲-۳- تعادل حرارتی فشارها ۴۶

## فصل چهارم : محاسبات و مدلسازی جریان گاز

- ۱-۴- محاسبات جریان گاز با استفاده از انتگرال ضرائب زاویه‌ای ۵۱  
 ۲-۴- مدل سازی جریان گاز ۵۶

## فصل پنجم : بررسی پدیده دفع گاز (Gas Evolution)

- ۱-۵- تحلیل و مدلسازی دفع گاز ۶۳

## فصل ششم : تحلیل رژیمهای جریان گاز در خلاء

- ۱-۶- انواع رژیمهای جریان گاز درون لوله های تحت خلاء ۷۱  
 ۲-۶- بررسی معادلات کانداکتانس در جریان مولکولی ۷۳  
 ۱-۲-۶- کانداکتانس یک مجرا ۷۳  
 ۲-۲-۶- چگونگی محاسبه کانداکتانس برای مجراهای بلند ۷۴

۷۴	۳-۲-۶- چگونگی محاسبه کانداکتانس برای مجراهای کوتاه
۷۵	۴-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای لوله ای
۷۷	۵-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای مستطیلی
۸۰	۶-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای بیضوی شکل
۸۲	۷-۲-۶- محاسبه کانداکتانس یک آنالاس(ناحیه واقع بین دو استوانه هم مرکز)
۸۴	۸-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای مثلثی
۸۵	۹-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در زانوها
۸۶	۱۰-۲-۶- محاسبه کانداکتانس یک اریفیس
۸۷	۱۱-۲-۶- محاسبه کانداکتانس در یک سیستم متشکل از چندین جزء (در جریان مولکولی)
۹۰	۳-۶- موارد جریان ناپا
۹۲	۴-۶- جریان ویسکوز و محاسبات کانداکتانس
۹۳	۱-۴-۶- جریان آرام ویسکوز
۹۴	۱-۱-۴-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای لوله ای
۹۵	۲-۱-۴-۶- محاسبه کانداکتانس در مجراهای مستطیلی
۹۶	۳-۱-۴-۶- محاسبه کانداکتانس در آنالاس
۹۶	۴-۱-۴-۶- محاسبه کانداکتانس یک اریفیس
۹۷	۲-۴-۶- بررسی جریان توربولنت
۱۰۰	۵-۶- جریان انتقالی
۱۰۰	۱-۵-۶- بررسی جریان در مجراهای طولانی

### فصل هفتم : روشهای مکانیکی تولید خلاء

۱۰۳	۱-۷- مشخصه های عمومی پمپهای مکانیکی خلاء
۱۰۵	۲-۷- پمپاژ حجمی (Volume Pumping)
۱۱۱	۳-۷- مدل‌های مختلف پمپهای جابجایی
۱۱۱	۱-۳-۷- پمپهای پیستونی و دیافراگمی
۱۱۳	۲-۳-۷- پمپهای رینگ مایع (liquid Ring Pump)
۱۱۶	۱-۲-۳-۷- مایع عملیاتی
۱۱۷	۲-۲-۳-۷- محدوددهای عملیاتی پمپهای اژکتور گاز- رینگ مایع
۱۱۸	۳-۲-۳-۷- کاویتاسیون و حفاظت در برابر آن

۱۱۹	۴-۲-۳-۷- انواع عملیات، انتقال مایع عملیاتی
۱۲۰	۵-۲-۳-۷- مواد سازنده
۱۲۰	۶-۲-۳-۷- آب بندی
۱۲۱	۷-۲-۳-۷- انتقال دهنده های قدرت (Drives)
۱۲۲	۸-۲-۳-۷- تجهیزات جانبی
۱۲۲	۳-۳-۷- پمپهای پروانه ای چرخشی (Rotary vane pumps)
۱۲۲	۴-۳-۷- پمپهای چرخشی چند پروانه ای (Multivane rotary pumps)
۱۲۲	۵-۳-۷- پمپهای پروانه در استاتور (Vane-in-stator pumps)
۱۲۴	۶-۳-۷- پمپهای شناور (Plunger pumps)
۱۲۶	۷-۳-۷- پمپهای روتس (Roots pumps)
۱۲۸	۸-۳-۷- پمپ چنگکی (Claw Pump)
۱۳۱	۹-۳-۷- پمپهای پیچوار (Screw pumps)
۱۳۴	۱۰-۳-۷- پمپهای حلزونی (Scroll pumps)
۱۳۶	۴-۷- پمپاژ به شیوه مولکولی (Molecular pumping)
۱۴۲	۱-۴-۷- مدل‌های پمپهای مولکولی
۱۴۴	۲-۴-۷- پمپهای توربومولکولی (Turbomolecular pumps)
۱۴۵	۱-۲-۴-۷- روغنکاری یا تاقانهای مکانیکی
۱۴۶	۲-۲-۴-۷- مواد روتور
۱۴۶	۳-۲-۴-۷- تهویه
۱۴۶	۴-۲-۴-۷- پخت (Backing)
۱۴۷	۵-۲-۴-۷- سرد سازی
۱۴۷	۶-۲-۴-۷- پمپاژ گازهای خورنده
۱۴۸	۷-۲-۴-۷- پمپاژ گازهای سمی و رادیواکتیو
۱۴۸	۸-۲-۴-۷- نسبت تراکم پمپ توربو مولکولی
۱۴۹	۹-۲-۴-۷- سرعت پمپاژ یک پمپ توربومولکولی
۱۵۰	۱۰-۲-۴-۷- فشار نهایی یک پمپ توربومولکولی
۱۵۰	۱۱-۲-۴-۷- ترکیب پمپهای کشش مولکولی- توربو مولکولی
۱۵۰	۱۲-۲-۴-۷- پمپهای پشتیبان
۱۵۱	۵-۷- پمپاژ با فواره بخار (Vapor Jet pumping)

- ۱۶۱ ۷-۵-۱- مدلهای پمپهای فواره بخار  
 ۱۶۲ ۷-۶- تله ها ( Trsps )

### فصل هشتم : روشهای شیمی فیزیکی تولید خلاء

- ۱۷۰ ۸-۱- پمپاژ به شیوه یونی  
 ۱۷۲ ۸-۲- پمپاژ به شیوه جذب شیمیایی  
 ۱۷۵ ۸-۳- پمپهای تبخیری (Evaporation pumps)  
 ۱۷۷ ۸-۴- پمپاژ به شیوه سردساز چگالشی  
 ۱۸۱ ۸-۵- پمپاژ به شیوه سردسازی جذبی  
 ۱۸۷ ۸-۶- پمپهای سرد ساز  
 ۱۹۰ ۸-۷- پمپاژ به شیوه یونی - گازگیر (Getter- Ion pumping)  
 ۱۹۲ ۸-۷-۱- پمپهای یونی - گازگیر (Getter-Ion pumps)

### فصل نهم : روانسازها و سیالات پمپهای خلاء

- ۱۹۷ ۹-۱- خواص سیالات پمپهای خلاء  
 ۲۰۱ ۹-۱-۱- مشخصه‌های دیگر سیالات پمپ  
 ۲۰۲ ۹-۲- انواع سیالات پمپ  
 ۲۰۲ ۹-۲-۱- روغنهای معدنی  
 ۲۰۴ ۹-۲-۲- سیالات سنتزی  
 ۲۰۵ ۹-۲-۳- استرها  
 ۲۰۵ ۹-۲-۴- سیلیکونها  
 ۲۰۶ ۹-۲-۵- اترها  
 ۲۰۷ ۹-۲-۶- روانسازهای فلورینه  
 ۲۰۷ ۹-۲-۶-۱- روغنهای Krytox  
 ۲۱۰ ۹-۲-۶-۲- روغنهای Fomblin  
 ۲۱۵ ۹-۳- گریسها  
 ۲۱۶ ۹-۳-۱- گریسهای Krytox  
 ۲۱۸ ۹-۳-۱-۱- گریس Krytox LVP HV  
 ۲۱۹ ۹-۳-۲- گریسهای Fomblin  
 ۲۲۱ ۹-۳-۲-۱- خواص استاندارد گریسهای Fomblin

۲۲۵	۴-۹- عملکرد روغن‌ها در پمپ‌های مختلف خلاء
۲۲۵	۴-۹-۱- روغن‌های مورد استفاده در پمپ‌های توربومولکولی
۲۲۶	۴-۹-۲- سیالات مورد استفاده در پمپ‌های نفوذی
۲۲۹	۴-۹-۵- بازیافت روغن‌ها

### فصل دهم : تحلیل روش‌های مختلف اندازه‌گیری فشار

۲۳۴	۱-۱۰- روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری فشار
۲۴۰	۱-۱۰-۲- روش‌های حرارتی اندازه‌گیری فشار
۲۴۴	۱-۱۰-۳- روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری فشار کلی
۲۵۵	۱-۱۰-۴- روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری فشار جزئی
۲۶۷	۱-۱۰-۵- روش‌های جذبی اندازه‌گیری فشار
۲۸۰	۱-۱۰-۶- کالیبراسیون مبدل‌ها

### فصل یازدهم : تحلیل سیستم‌های خلاء

۲۷۷	۱-۱۱- انتخاب سیستم پمپاژ
۲۹۰	۱-۱۱-۲- محاسبات بار گاز
۲۹۲	۱-۱۱-۳- معادلات پمپاژ در حالت پایا
۲۹۶	۱-۱۱-۴- اتصال تجهیزات خلاء
۳۰۱	۱-۱۱-۴-۱- اتصال پمپ‌ها
۳۰۹	۱-۱۱-۵- زمان پمپاژ ( Pumpdown time or Time of pumping )
۳۱۶	۱-۱۱-۶- هزینه پمپاژ ( Cost of pumping )
۳۱۹	۱-۱۱-۷- محاسبات تعیین‌کننده یک سیستم خلاء

### فصل دوازدهم : طراحی سیستم‌های خلاء

۳۳۱	۱-۱۲- بانک اطلاعاتی المنت‌های یک سیستم خلاء
۳۳۲	۱-۱۲-۲- طراحی ساختاری سیستم‌های خلاء با استفاده از روش انتخاب متغیرها
۳۳۳	۱-۱۲-۳- طراحی ساختاری با استفاده از نقشه نمونه
۳۳۶	۱-۱۲-۴- طراحی پارامتری یک سیستم خلاء با استفاده از ضریب بهره‌وری پمپ
۳۳۹	۱-۱۲-۵- طراحی چندپارامتری یک سیستم خلاء
۳۴۲	۱-۱۲-۶- سرهم‌بندی تجهیزات
۳۴۴	۱-۱۲-۷- محاسبات طرح ریزی یک سیستم خلاء

**فصل سیزدهم : فلومترها**

- ۳۶۵ ۱-۱۳-۱ روشهای مستقیم اندازه گیری جریان
- ۳۶۸ ۱-۱۳-۱-۱ روش فشار ثابت اندازه گیری فشار
- ۳۶۹ ۱-۱۳-۲ روش حجم ثابت اندازه گیری جریان
- ۳۷۲ ۱-۱۳-۳ روتامترها و خفه کننده ها ( Rotameters and chokes )
- ۳۷۴ ۱-۱۳-۲ اندازه گیری جریان با استفاده از تکنیکهای جریان سنجی حرارتی
- ۳۷۴ ۱-۱۳-۲-۱ جریان سنجهای جرمی

**فصل چهاردهم : ساختمان سیستمهای خلاء**

- ۳۸۳ ۱-۱۴-۱ مواد مورد استفاده در مهندسی خلاء
- ۳۸۹ ۱-۱۴-۲ اتصالات باز نشدنی (دائمی)
- ۳۹۹ ۱-۱۴-۳ اتصالات غیر دائمی خلاء (Detachable or Demountable)
- ۴۰۷ ۱-۱۴-۴ خطوط لوله خلاء
- ۴۱۰ ۱-۱۴-۵ وسایلی جهت انتقال حرکت به داخل خلاء
- ۴۱۶ ۱-۱۴-۶ اتصالات الکتریکی خلاء
- ۴۱۸ ۱-۱۴-۷ شیرهای خلاء

**فصل پانزدهم : نشت یابی در سیستمهای خلاء**

- ۴۲۷ ۱-۱۵-۱ نشتیها و منابع گازی موجود در یک سیستم
- ۴۳۰ ۱-۱۵-۲ روشهای نشت یابی بدون استفاده از نشت یاب
- ۴۳۳ ۱-۱۵-۳ اندازه گیری نرخ نشتی به کمک نشت یاب
- ۴۴۲ ۱-۱۵-۳-۱ نشت یابی اجزاء موجود در یک سیستم تحت خلاء توسط هلیوم
- ۴۴۶ ۱-۱۵-۳-۲ نشت یابی یک سیستم خلاء (اجزاء بزرگ)
- ۴۴۹ ۱-۱۵-۴ نشت یابهای مجهز به اسپکترومتر جرمی (MSLD)
- ۴۵۰ ۱-۱۵-۵ تشریح عملکرد یک نشت یاب
- ۴۵۱ ۱-۱۵-۶ طیف سنج چهار قطبی
- ۴۵۳ ۱-۱۵-۷ طیف سنج مجهز به میدان مغناطیسی با انحراف  $180^0$
- ۴۵۵ ۱-۱۵-۸ نشت یابهای هلیوم جریان مستقیم
- ۴۵۷ ۱-۱۵-۹ نشت یابهای ساده هلیوم با جریان معکوس
- ۴۶۰ ۱-۱۵-۹-۱ نشت یابهای هلیوم جریان معکوس پیشرفته

۱۵-۱۰- نشت یابهای خشک هلیوم ۴۶۲

## فصل شانزدهم : تمیزکاری سیستمهای خلاء

۱-۱۶- ملاحظات کلی ۴۶۵

۱-۱-۱۶- ملاحظات طراحی ۴۶۵

۲-۱-۱۶- انتخاب مواد ۴۶۶

۳-۱-۱۶- ابعاد و اندازه‌های قطعات و تجهیزات ۴۶۶

۴-۱-۱۶- صیقل کاری سطوح ۴۶۶

۵-۱-۱۶- دفع گاز از سطوح ۴۶۷

۶-۱-۱۶- آلوده کننده‌های سطحی ۴۶۷

۷-۱-۱۶- گازهای جذب سطحی شده ۴۶۷

۸-۱-۱۶- گازهای جذب عمقی شده ۴۶۷

۹-۱-۱۶- فیلمهای اکسیدی ۴۶۸

۲-۱۶- انتخاب فرآیند تمیزکاری ۴۶۸

۱-۲-۱۶- فرآیند و فشار کاری ۴۶۸

۲-۲-۱۶- مواد ۴۶۸

۳-۲-۱۶- ابعاد و اندازه قطعات ۴۶۸

۴-۲-۱۶- طرح مورد نظر و در دسترس جهت تمیزکاری ۴۶۹

۵-۲-۱۶- ایمنی و اقتصاد ۴۶۹

۳-۱۶- شیوه‌های تمیزکاری ۴۶۹

۱-۳-۱۶- تمیز کاری به شیوه مکانیکی ۴۶۹

۲-۳-۱۶- حذف آلودگیهای زبر و خشن ۴۶۹

۳-۳-۱۶- حذف رنگها و چسبها ۴۷۰

۴-۳-۱۶- حذف گل و گدازه‌های جوشکاری ۴۷۰

۵-۳-۱۶- فواره‌های دانه‌های تر ۴۷۰

۶-۳-۱۶- فواره دانه‌های خشک ۴۷۰

۷-۳-۱۶- چربی زدایی به شیوه غوطه‌وری ۴۷۰

۸-۳-۱۶- چربی زدایی با بخار ۴۷۰

۹-۳-۱۶- چربی زدایی با قلیا ۴۷۱

۱۰-۳-۱۶- اسید شویی ۴۷۱



صفحه	فهرست مطالب	عنوان
۴۷۲	۱۱-۳-۱۶	پسیو سازی
۴۷۲	۱۲-۳-۱۶	شستشو با آب
۴۷۲	۱۳-۳-۱۶	براق سازی
۴۷۲	۱۴-۳-۱۶	پوشش گذاری
۴۷۳	۱۵-۳-۱۶	خشک کردن و جابجایی
۴۷۳	۱۶-۳-۱۶	فرآیند پخت
۴۷۴	۴-۱۶	بسته بندی
۴۷۴	۵-۱۶	تکنیکهای کلی تمیزکار
۴۷۴	۶-۱۶	فرآیندهای تمیزکاری خاص
۴۷۴	۱-۶-۱۶	شستشوی سرامیکها
۴۷۵	۲-۶-۱۶	تمیزکاری شیشه
۴۷۵	۱-۲-۶-۱۶	تمیزکاری شیشه آلات جدید
۴۷۵	۲-۲-۶-۱۶	روش ثانوی
۴۷۵	۷-۱۶	تمیزکاری اجزاء و کارخانه خلاء پس از استفاده
۴۷۹		ضمائم