



دانشگاه پشاور  
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی شیمی گرایش جداسازی

عنوان:

# تخمین پروفایل دما در آکنه های ساختار یافته به کمک ضرایب انتقال جرم با استفاده از آنالیز CFD

استاد راهنما:

دکتر مرتضی زیودار

تحقیق و نگارش:

محمد دربندی گلیمان

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

شهریور ۱۳۸۹

## چکیده

برج‌های آکنده حاوی آکنده‌های ساختار یافته در فرآیندهای جداسازی نظیر تقطیر و جذب کاربرد فراوانی دارند. در مقایسه با آکنده‌های نامنظم و انواع سینی‌ها، آکنده‌های ساختاریافته دارای ویژگی‌های بارزی از جمله افت فشار کمتر و راندمان جداسازی بالاتر می‌باشند. بدین منظور ارائه مدل‌هایی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی جهت تخمین افت فشار، راندمان جداسازی و چگونگی توزیع فازها در یک برج آکنده حاوی آکنده‌های ساختار یافته هدف این تحقیق می‌باشد.

جهت بررسی و ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم در برج‌های آکنده مدل‌هایی که بر اساس معادلات ناویر استوکس و معادلات انتقال جرم پایه‌ریزی شده‌اند ارائه گردیده است و روابط با ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و توسط نرم افزار تجاری و قدرتمند CFX-11 که محصول شرکت Ansys می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مقادیر افت فشار بستر خشک، افت فشار مرطوب و راندمان جداسازی که توسط آنالیز CFD محاسبه شده‌اند، با داده‌های تجربی مقایسه شده و میزان متوسط خطای نسبی مربوط به تخمین افت فشار خشک، افت فشار مرطوب و راندمان جداسازی به ترتیب برابر با ۱۲، ۱۴ و ۸ درصد بدست آمد. در مجموع، مطابقت نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی مشاهده شد و این تطابق نشان‌دهنده کارایی خوب مدل‌های پیشنهاد شده جهت شبیه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم در برج‌های آکنده حاوی آکنده‌های ساختاریافته می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** آکنده‌های ساختاریافته- افت فشار- انتقال جرم- دینامیک سیالات محاسباتی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	پیش‌گفتار.....
۲.....	مقدمه.....
۲.....	اهداف کلی پروژه.....
۳.....	ساختار پروژه.....
۴.....	فصل : اول- مروری بر برج‌های آکنده و آکنه‌های ساختاریافته.....
۵.....	مقدمه.....
۶.....	۱-۱- برج‌های سینی‌دار.....
۷.....	۲-۱- برج‌های آکنده.....
۹.....	۱-۲-۱- سیستم توزیع کننده مایع در برج.....
۱۰.....	۲-۲-۱- سیستم ورودی گاز به برج‌های آکنده.....
۱۱.....	۳-۲-۱- بستر آکنده.....
۱۱.....	۳-۱- آکنه‌های نامنظم.....
۱۲.....	۱-۳-۱- ویژگی‌های آکنه‌های نامنظم.....
۱۳.....	۲-۳-۱- تاریخچه آکنه‌های نامنظم.....
۱۴.....	۴-۱- آکنه‌های ساختاریافته.....
۱۵.....	۲-۴-۱- ویژگی‌های آکنه‌های ساختاریافته.....

۱-۴-۳- مشخصات هندسی آکنه‌های ساختاریافته.....	۱۶
نتیجه‌گیری.....	۱۹
فصل دوم: مدل‌های تجربی.....	۲۰
مقدمه.....	۲۱
۱-۲- افت فشار در برج‌های آکنده.....	۲۱
۲-۲- مدل‌های افت فشار در آکنه‌های ساختاریافته.....	۲۱
۳-۲- مدل‌های انتقال جرم در آکنه‌های ساختاریافته.....	۲۶
نتیجه‌گیری.....	۲۷
فصل سوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه آنالیز CFD برج‌های آکنده.....	۲۸
مقدمه.....	۲۹
۱-۳- تاریخچه استفاده از CFD جهت مدل‌سازی برج‌های آکنده.....	۲۹
نتیجه‌گیری.....	۴۴
فصل چهارم: هندسه و شرایط مرزی.....	۴۵
مقدمه.....	۴۶
۱-۴- فرضیات مورد استفاده.....	۴۶
۲-۴- معادلات حاکم بر سیستم.....	۴۷
۱-۲-۴- معادلات حاکم برای مدل‌سازی و تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی برج.....	۴۷
۲-۲-۴- معادلات حاکم برای تحلیل انتقال جرم.....	۴۹
۳-۴- مراحل مدل‌سازی.....	۴۹
۴-۴- تولید هندسه مدل.....	۵۲
۵-۴- شبکه‌بندی مدل.....	۵۳
۶-۴- شرایط مرزی.....	۵۵
۱-۶-۴- شرایط مرزی مورد استفاده برای تحلیل افت فشار یک فازی.....	۵۵

۵۷	۲-۶-۴- شرایط مرزی مورد استفاده برای تحلیل افت فشار دو فازی.....
۵۹	۳-۶-۴- شرایط مرزی مورد استفاده برای انتقال جرم.....
۶۰	۷-۴- تخمین مقادیر اولیه.....
۶۰	نتیجه‌گیری.....
۶۲	فصل پنجم: بحث و نتیجه‌گیری.....
۶۳	مقدمه.....
۶۳	۱-۵- تحلیل نتایج حاصل از آنالیز CFD در افت فشار.....
۶۳	۱-۱-۵- تحلیل نتایج حاصل از آنالیز CFD افت فشار تک فازی.....
۶۸	۲-۱-۵- نتایج مربوط به افت فشار دو فازی.....
۷۲	۲-۵- تحلیل نتایج حاصل از آنالیز CFD انتقال جرم.....
۷۷	نتیجه‌گیری.....
۷۹	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
۸۰	۱-۶- نتیجه‌گیری.....
۸۱	۲-۶- پیشنهادها.....
۸۲	مراجع.....
۸۷	پیوست الف.....
۱۰۵	پیوست ب.....
۱۰۸	پیوست پ.....

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۱۵.....	جدول ۱-۱: تاریخچه آکنه‌های مختلف.....
۱۶.....	جدول (۲-۱) مزایا و معایب آکنه‌های ساختاریافته و نامنظم در مقایسه با انواع سینی.....
۱۸.....	جدول (۳-۱): مشخصات هندسی انواع آکنه‌های ساختاریافته.....
۲۵.....	جدول ۱-۲- مقادیر ضرایب $B_1, B_2, B_3, B_4$ و $\beta$ .....
۵۲.....	جدول ۱-۴- مشخصات هندسی آکنه‌ساختار یافته.....
۵۷.....	جدول ۲-۴. شرایط مورد استفاده در قسمت افت فشار تک فازی.....
۵۹.....	جدول ۳-۴. شرایط مورد استفاده در قسمت دو فازی.....
۷۲.....	جدول ۱-۵ - میزان متوسط خطای نسبی در سرعت‌های ظاهری مختلف مایع.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان شکل	صفحه
شکل ۱-۱- تعداد سینی‌های تئوری مورد نیاز بر حسب نسبت فراریت اجزاء.....	۶
شکل (۲-۱): قسمت‌های مختلف یک برج آکنده.....	۸
شکل (۴-۱): انواع مختلف آکنه‌های نامنظم.....	۱۲
شکل (۵-۱) انواع مختلف صفحات نگه‌دارنده بستر در برج‌های آکنده.....	۱۲
شکل (۶-۱) طرز قرار گرفتن صفحات و شکل کانال‌ها در آکنه‌های ساختاریافته.....	۱۷
شکل (۷-۱): مشخصات هندسی و جهت جریان فاز گاز و مایع در آکنه‌های ساختاریافته.....	۱۸
شکل (۱-۳). مدل ارائه شده توسط Higler.....	۲۹
شکل (۲-۳). پروفایل دما در آکنه KATAPACK-M برای جریان هوا.....	۳۰
شکل (۳-۳) مدل پیشنهادی توسط T. Loser.....	۳۱
شکل (۴-۳): مدل ارائه شده توسط Krishna و Vanbaten.....	۳۲
شکل (۵-۳) چگونگی توزیع جسم ردیاب در بستر.....	۳۳
شکل (۶-۳) نمایی از شبیه‌سازی نحوه توزیع تجمع مایع در ستون پرشده آکنه Raschig	
.....ring	۳۴
شکل (۷-۳): مدل ارائه شده توسط F. Larachi و C. F. Petre.....	۳۵
شکل (۸-۳) خطوط مسیر فاز گاز در بخش‌های مختلف آکنه ساختاریافته Montzpack.....	۳۵
شکل (۹-۳): مدل ارائه شده توسط Beat Szulczewske.....	۳۶
شکل (۱۰-۳) توزیع سرعت در مدل ارائه شده توسط Beat Szulczewske.....	۳۷

- شکل (۱۱-۳) بردارهای سرعت فاز گاز در اطراف سیستم توزیع‌کننده مایع..... ۳۸
- شکل (۱۲-۳) خطوط مسیر فاز گاز در انواع مختلف سیستم‌های ورودی گاز به برج‌های آکنده..... ۳۹
- شکل (۱۳-۳): مدل پیشنهادی توسط L. Raynal..... ۴۰
- شکل (۱۴-۳): مدل پیشنهادی توسط Prashant Valluri..... ۴۱
- شکل (۱۵-۳): پروفایل سرعت فاز مایع در آکنه..... ۴۱
- شکل (۱۶-۳) شکل هندسی مدل بررسی شده توسط Ataki و Bart..... ۴۲
- شکل (۱۷-۳) میدان جریان فاز مایع در آکنه Rombopack..... ۴۳
- شکل (۱۸-۳). توزیع جزء جرمی متانول در طول بستر..... ۴۳
- شکل (۱۹-۳). بردار سرعت هوا در آکنه Sulzer BX..... ۴۴
- شکل ۴-۱- مراحل انجام گرفته برای آنالیز CFD و تحلیل یک فرایند جداسازی در یک آکنه ساختاریافته..... ۵۱
- شکل ۴-۲- مدل هندسی پیشنهادی برای شبیه‌سازی..... ۵۲
- شکل ۴-۳. انواع المان‌های قابل قبول در نرم افزار CFX..... ۵۳
- شکل ۴-۴- شبکه تولید شده برای شبیه‌سازی..... ۵۴
- شکل ۴-۵. نحوه جریان گاز در قسمت افت فشار تک فاز..... ۵۶
- شکل ۴-۶- شرایط مرزی مورد استفاده برای بررسی افت فشار دوفازی..... ۵۷
- شکل ۴-۶- شرایط مرزی مورد استفاده برای بررسی انتقال جرم..... ۶۰
- شکل ۵-۱- کانتور فشار در سرعت جرمی هوا برابر با  $\frac{kg}{m^2s} \cdot 0.78$ ..... ۶۴
- شکل ۵-۲- کانتور فشار در آکنه در ارتفاع مختلف..... ۶۵
- شکل ۵-۳- جهت جریان گاز درون آکنه..... ۶۶
- شکل ۵-۳- جهت جریان گاز درون آکنه..... ۶۷
- شکل ۵-۵- کانتور فشار در حالت دو فازی بر روی یک صفحه در مرکز المان..... ۶۸



- شکل ۵-۶- کانتور سرعت مایع در یک صفحه در وسط آکنه.....۶۹
- شکل ۵-۶- کانتور سرعت گاز در یک صفحه در وسط آکنه.....۶۹
- شکل ۵-۷- توزیع جزء حجمی فاز مایع بر روی یک صفحه عمودی در وسط بستر.....۷۰
- ۸- نمودار رطوبت سنجی هوا- بخار آب در فشار یک اتمسفر.....۷۳
- شکل ۵-۸- کانتور کسر جرمی بخار آب در یک صفحه در وسط آکنه.....۷۶
- ۵-۹- تغییرات دمای شبیه‌سازی شده در طول بستر با استفاده از کسر جرمی.....۷۷

## فهرست علائم

سطح موثر آکنه ( $m^2/m^3$ )	$a_e$
سطح ویژه آکنه ( $m^2/m^3$ )	$a_p$
قاعده کانال مثلثی (m)	b
ضریب دراگ بین فازها ( $kg/sm^3$ )	C
ضریب نفوذ فاز گاز	$D_G$
ضریب نفوذ فاز گاز	$D_G$
قطر معادل آکنه (m)	$d_{eq}$
نیروی دراگ ( $N/m^3$ )	F
فاز گاز	G
شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )	g
ارتفاع معادل یک سینی (m)	HTU
ارتفاع کانال در آکنه (m)	h
موجودی فاز مایع	$h_L$
ضریب انتقال جرم (m/s)	K
فاز مایع	L
فشار (pa)	P
ضلع مجاور قاعده در کانال مثلثی (m)	S
دمای خشک هوا ( $^{\circ}C$ )	$T_G$
دمای حباب مرطوب هوا ( $^{\circ}C$ )	$T_w$

سرعت ظاهری فاز گاز (m/s)	$u_{Gs}$
سرعت واقعی فاز گاز (m/s)	$u_{Ge}$
سرعت ظاهری فاز مایع (m/s)	$u_{Ls}$
سرعت واقعی فاز مایع (m/s)	$u_{Le}$
مقدار رطوبت هوا	$Y'$
مقدار تخلخل آکنه	$\epsilon_p$
زاویه راس کانال آکنه (درجه)	$\theta$
جزء حجمی فاز $\alpha$	$\gamma_\alpha$
ویسکوزیته ( $kg / m.s$ )	$\mu$
دانسیته ( $kg / m^3$ )	$\rho$
تانسور تنش ( $N / m^2$ )	$\tau$
کشش سطحی ( $N / m$ )	$\sigma$

## پیش‌گفتار

## مقدمه:

امروزه از برج‌های آکنده (پرشده) در فرآیندهای مختلف جداسازی نظیر تقطیر، جذب و استخراج در طیف وسیعی استفاده می‌شود. از جمله مزایای برج‌های آکنده نسبت به برج‌های سینی دار می‌توان به افت فشار کمتر و راندمان بالاتر این برج‌ها اشاره کرد. نقش بستر آکنده در این برج‌ها ایجاد سطح تماس بیشتر برای انجام عمل انتقال جرم بین فازهای مایع و بخار می‌باشد [۱-۲].

آکنه‌ها به دو دسته کلی نامنظم<sup>۱</sup> و ساختاریافته<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. آکنه‌های ساختاریافته نسبت به آکنه‌های نامنظم دارای راندمان و ظرفیت بالاتر، افت فشار کمتر و قیمت زیادتر می‌باشند.

جهت طراحی بهینه برج‌های آکنده پارامترهای زیادی باید مورد توجه قرار گیرد، مثل پارامترهای مربوط به انتقال جرم و پارامترهای هیدرودینامیکی برج. از جمله پارامترهای موثر بر عملکرد برج می‌توان به افت فشار خشک، افت فشار دو فازی و راندمان انتقال جرم اشاره کرد. راندمان جداسازی در یک برج آکنده را معمولاً توسط پارامتر ارتفاع معادل یک سینی تئوری یا به اختصار HETP<sup>۳</sup> بیان می‌نمایند [۳-۴]. بنابراین تخمین صحیح HETP جهت طراحی بهینه یک برج آکنده بسیار قابل توجه می‌باشد.

## اهداف کلی پروژه:

اهداف کلی که در این تحقیق دنبال می‌شوند را می‌توان به دو بخش زیر تقسیم نمود:  
ارائه مدل‌هایی بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) جهت تحلیل چگونگی توزیع فاز گاز و مایع، تخمین افت فشار یک فازی و دوفازی و محاسبه راندمان جداسازی در آکنه ساختار یافته Sulzer BX و در نهایت تخمین پروفایل دما در این آکنه با استفاده از ضرایب انتقال جرم.  
برای رسیدن به اهداف ذکر شده، هم از روش‌های ریاضی و نظری و هم از روش‌های تجربی بهره گرفته شده است.

- 
۱. Random packing
  ۲. Structured packing
  ۳. Height Equivalent to Theoretical Plate
  ۴. Computational Fluid Dynamics

در بخش شبیه‌سازی، معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و انتقال جرم در حالت پایا جهت محاسبه توزیع فشار، سرعت و غلظت فازها توسط نرم افزار CFX-11 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### ساختار پروژه:

ساختار نوشتاری این پروژه به صورت زیر طبقه بندی گردیده است:

این تحقیق شامل شش فصل می‌باشد. پس از ارائه پیش‌گفتار، توضیحاتی در باره برج‌های آکنده و ویژگی‌های آن‌ها در فصل اول ارائه گردیده است. در این فصل، جزئیاتی از ساختار برج‌های آکنده و آکنه‌های ساختاریافته بیان شده است. انواع آکنه‌های ساختاریافته، مزایای آکنه‌های ساختاریافته نسبت به برج‌های سینی‌دار و آکنه‌های نامنظم و مشخصات هندسی آکنه‌های ساختار یافته در این بخش ارائه شده است.

در فصل دوم، پارامترهای موثر بر عملکرد برج‌های آکنده توضیح داده شده و مدل‌های تئوری افت فشار و انتقال جرم بحث و بررسی شده‌اند.

در فصل سوم مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه آنالیز CFD برج‌های آکنده ذکر می‌گردد.

در فصل چهارم، مدل‌سازی سیستم توسط آنالیز CFD توضیح داده شده است. فرضیه‌های مدل پیشنهادی، معادله‌های حاکم بر مدل، رابطه‌های مربوط به انتقال جرم و پارامترهای هیدرودینامیکی، تولید هندسه مدل و شرایط مرزی و شرایط اولیه بکار گرفته شده در مدل‌سازی سیستم عنوان‌هایی هستند که در این فصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جهت اطمینان از صحت داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، این نتیجه‌ها باید با داده‌های تجربی مقایسه گردند. تفسیر نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه آن‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی در فصل پنجم گردآوری شده است. نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق و ارائه برخی از پیشنهادها جهت انجام تحقیق‌های بعدی در این زمینه نیز در فصل ششم ارائه شده است.

## فصل اول:

مروری بر برج‌های آکنده و آکنه‌های ساختاریافته

## مقدمه:

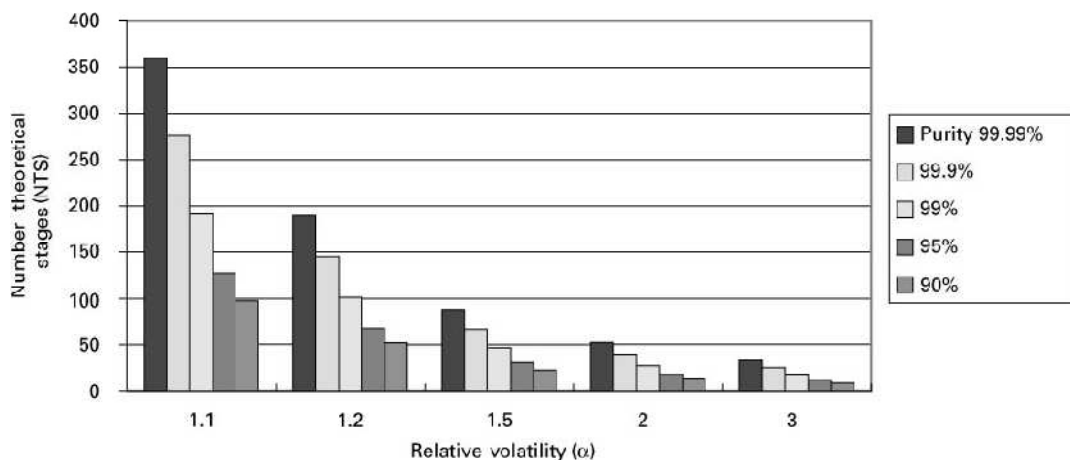
در بسیاری از بحث‌های مربوط به مهندسی و علوم، پدیده انتقال جرم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در اغلب عملیات انتقال جرم، هدف اصلی تفکیک اجزای یک مخلوط دو یا چند جزئی و تولید فرآورده‌های جدید می‌باشد. فرایندهای جداسازی بر عکس فرایندهای مخلوط شدن بوده و خودبخود انجام نمی‌شوند و جهت انجام آن‌ها به یک عامل جداسازی نیاز می‌باشد که ممکن است ماده یا انرژی باشد. معمولاً اثر افزودن عامل جداسازی تشکیل فاز دوم است. یکی از مهمترین فرایندهای جداسازی فرآیند تقطیر به شمار می‌آید.

تقطیر متداول‌ترین و مهم‌ترین روش جداسازی می‌باشد و معمولاً به عنوان اولین انتخاب مد نظر قرار می‌گیرد. عامل جداسازی در تقطیر انرژی حرارتی بوده و اساس جداسازی اختلاف در فشار بخار یا فراریت نسبی اجزاء می‌باشد. هر چه مقدار فراریت نسبی اجزاء در عمل تقطیر افزایش یابد عملیات جداسازی راحت‌تر انجام می‌پذیرد. در شکل (۱-۱) تعداد سینی‌های تئوری مورد نیاز بر حسب نسبت فراریت اجزاء نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که عملیات تقطیر در حالتی که اختلاف فراریت اجزاء از مقدار مشخصی کمتر باشد نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. با این حال مزایای فرآیند تقطیر نسبت به سایر روش‌های جداسازی نظیر استخراج کاملاً روشن است. عمل تقطیر به سهولت انجام می‌گیرد و به راحتی در هر مقیاسی قابل انجام است. در این فرآیند هیچ‌گونه ماده جدیدی وارد سیستم نشده و آلودگی کمتری نسبت به سایر روش‌های جداسازی دارد؛ و از نظر هزینه نیز نسبت به فرآیندهایی مثل استخراج، اقتصادی‌تر می‌باشد [۵-۶].

جهت ایجاد تماس بین فازهای مایع و بخار و انجام عمل انتقال جرم بین فازها، می‌توان از سینی و یا بستر آکنده

در برج‌های تقطیر استفاده کرد.





شکل ۱-۱- تعداد سینی‌های تئوری مورد نیاز بر حسب نسبت فراریت اجزاء [Y]

در این فصل جزئیاتی از ساختار برج‌های آکنده و آکنه‌های ساختاریافته بیان شده است. انواع آکنه‌های ساختاریافته، مزایای آکنه‌های ساختاریافته نسبت به سینی‌ها و آکنه‌های نامنظم و مشخصات هندسی آکنه‌ها در این بخش ارائه شده است.

#### ۱-۱- برج‌های سینی‌دار:

در برج‌های سینی‌دار، مایع از بالا وارد برج شده و پس از جریان یافتن در روی هر سینی از درون ناودانی که روی آن تعبیه شده است به پایین ریخته و وارد سینی بعدی می‌شود. جهت حرکت فاز بخار درون برج به سمت بالا و در خلاف جهت مایع می‌باشد. جریان در طول برج به صورت ناهمسو و در روی هر سینی به صورت متقاطع است. فاز گاز پس از عبور از درون مجراهای روی هر سینی به صورت حباب‌هایی درون فاز مایع پراکنده می‌شود. در حقیقت در برج‌های سینی‌دار، فاز گاز پراکنده و فاز مایع پیوسته می‌باشد.

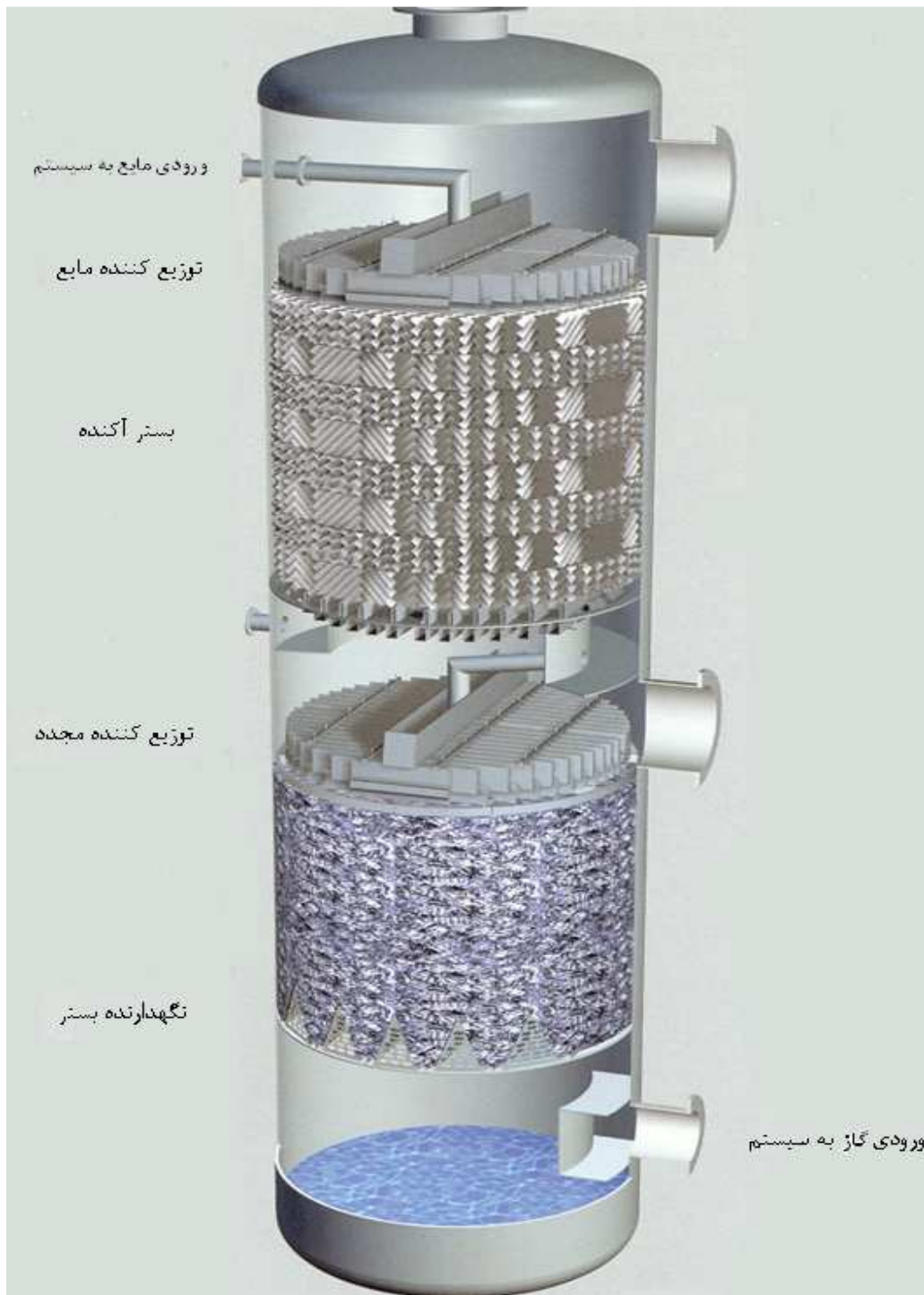
#### ۲-۱- برج‌های آکنده :

برج‌های آکنده سیستم‌های تماس دهنده پیوسته هستند که در آنها برعکس برج‌های سینی دار گاز فاز پیوسته می‌باشد. در برج‌های سینی‌دار در فضای خالی بین سینی‌ها، به علت عدم تماس مناسب بین فازها، انتقال جرم مربوط به این قسمت در نظر گرفته نمی‌شود و تغییرات غلظت منقطع است. ولی در برج‌های آکنده این فضای خالی وجود نداشته و تماس بین فازها پیوسته است. در چنین حالتی تمام نقاط موجود روی خط تبادل مشخص کننده

شرایط غلظت در هر نقطه‌ای داخل برج می‌باشند در حالی که در برج‌های سینی‌دار تنها نقاط معدودی در روی خط تبادل مشخص کننده غلظت دو فاز در حال تماس است و سایر نقاط مفهوم فیزیکی ندارند. از برج‌های تقطیر آکنده در صنعت در طیف وسیعی استفاده می‌شود و در بسیاری از موارد استفاده از این گونه برج‌ها نسبت به برج‌های سینی‌دار ارجحیت دارد. به‌ویژه در عملیات تقطیر در خلأ که لازم است افت فشار در برج کم باشد و یا در مواردی که به دلیل حساسیت مایع به حرارت زیاد، لازم است موجودی مایع در برج پایین باشد، استفاده از برج‌های پر شده مناسب‌تر است.

شکل (۱-۲) قسمت‌های مختلف یک برج آکنده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، هر برج آکنده دارای بخش‌های مختلفی از جمله بستر آکنده، سیستم ورودی و توزیع کننده مایع، سیستم ورودی گاز، نگه‌دارنده بستر و سیستم توزیع کننده مجدد مایع می‌باشد.

مهم‌ترین قسمت برج آکنده که در آن عملیات انتقال جرم صورت می‌گیرد قسمت بستر آکنده است. ضمن اینکه سیستم ورودی گاز به بستر و سیستم توزیع کننده مایع در بالای برج نیز در راندمان برج تاثیر زیادی دارند. بسیاری از مسائل و مشکلات برج‌های آکنده مربوط به این قسمت‌ها بویژه مربوط به توزیع فاز مایع در برج می‌باشد که به آن اشاره خواهد شد.



شکل (۲-۱): قسمت‌های مختلف یک برج آکنده [۸]

### ۱-۲-۱- سیستم توزیع کننده مایع در برج :

بیش از ۷۰٪ مشکلات مربوط به برج‌های آکنده، مربوط به توزیع ناقص مایع در برج می‌باشد. چنانچه توزیع مایع در برج به صورت یکنواخت و مناسب انجام نشود قسمتی از بستر بدون آغشته شدن به مایع در معرض جریان گاز قرار خواهد گرفت. در این صورت این قسمت از بستر اثری در انتقال جرم نخواهد داشت و به خاطر عدم تماس بین فاز مایع و گاز راندمان انتقال جرم کاهش می‌یابد. تاکنون تحقیق‌های مختلفی جهت بررسی توزیع فاز مایع و اثرات توزیع ناقص فاز مایع بر راندمان جداسازی برج‌های آکنده انجام گرفته است [۹-۱۱].

از سیستم‌های مختلفی برای توزیع یکنواخت مایع در برج استفاده می‌شود. یک نوع ساده از آن‌ها متشکل از چندین لوله در بالای بستر است که جریان مایع را به یک صفحه مشبک هدایت می‌کنند و بدین ترتیب توزیع یکنواختی از مایع در بستر ایجاد می‌شود. شکل (۳-۱) نوع‌های مختلفی از سیستم‌های توزیع کننده مایع را نشان می‌دهد. برای برج‌هایی که قطر آنها متجاوز از ۰/۱۲ متر است توصیه می‌شود جهت توزیع بهینه مایع، در هر متر مربع از بستر حداقل ۵۰ نقطه ورودی مایع به برج تعبیه شود. استفاده از شیپوره‌های پاشنده برای توزیع مایع در برج‌های آکنده مناسب نمی‌باشد، زیرا بخاطر تولید قطرات بسیار ریز، ماندگی مایع در گاز خروجی افزایش می‌یابد که باعث کاهش راندمان برج می‌گردد [۱۲و۱۳].

معیاری که جهت بیان چگونگی توزیع مایع استفاده می‌شود ضریب تغییرات  $C_V$  نام دارد و مقدار آن بستگی به نوع توزیع کننده دارد. بیلینگهام و همکارانش [۱۳] پیشنهاد کرده‌اند جهت توزیع مناسب مایع، ضریب  $C_V$  باید کمتر از ۰/۱۰ باشد. این پارامتر از رابطه زیر بدست می‌یابد:

$$C_V = \sqrt{\frac{1}{A} \int \left( \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 dA} \quad (1-1)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int u_i dA \quad (2-1)$$

در رابطه بالا  $A$  سطح مقطع کل برج،  $u_i$  سرعت موضعی و  $\bar{u}$  سرعت متوسط در مقطع ورودی خوراک است.