

# آموزش انتقال جرم در دوره کارشناسی رشته مهندسی شیمی

فتح‌ا... فرهادی، حسین تقدیسیان

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

**چکیده:** در این مقاله مطالب درس سه‌واحدی انتقال جرم بازننگری و ارائه شده است. تنوع و گستردگی مطالب کاربردی در این درس از یک سو و ناملموس بودن مفاهیم این نوع انتقال از سوی دیگر می‌بایست مدنظر قرار گیرد. بهره‌جویی کامل از تشابه بین پدیده‌های انتقال و استفاده از ابزارهای سمعی و بصری برای بیان مفاهیم این درس و نیز حفظ توازن بین روابط تحلیلی و تجربی توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال جرم، پدیده‌های انتقال، برج‌های آکنده و سینی‌دار، عملیات مرحله‌ای.

بین پدیده‌های انتقال، مبحث انتقال جرم به دلیل ناملموس بودن، پیچیده‌ترین آنهاست. دلیل این پیچیدگی آن است که وسیله سهل‌الوصولی که بتواند به آسانی دماسنجی، غلظت‌سنجی را نیز در آزمایشگاه انجام دهد هنوز در اختیار نداریم. به همین دلیل متأسفانه این مبحث بسیار انتزاعی می‌باشد. اگرچه موضوع انتقال جرم بین‌گرایش‌های مختلف رشته مهندسی شیمی، مشترک بوده و از اصلی‌ترین دروس این‌گرایش‌ها می‌باشد، ولی نیاز این‌گرایش‌ها به دلیل مصادیق متنوع تا حدودی متفاوت است. همچنین به دلیل آنکه این درس پیش‌نیاز بسیاری از دروس کاربردی دیگر همچون عملیات واحد ۱ و عملیات واحد ۲ می‌باشد، بنابراین تدریس آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۲. سیلابس درس

برنامه مصوب ستاد انقلاب فرهنگی که به صورت جزئی در سال‌های بعد از تصویب مورد بازنگری قرار گرفت با مختصر تغییراتی طی سالیان اخیر مورد استفاده بوده است. در این درس سه واحدی عموماً مبانی نظری انتقال جرم آموزش داده می‌شود. اما در دروس وابسته به این درس، همچون عملیات واحد ۱ و عملیات واحد ۲ و همچنین آزمایشگاه عملیات واحد مباحث این درس به نوع جنبه کاربردی و عملیات پیدا می‌کند.

در نهایت دانشجویان دوره کارشناسی با گذراندن این درس باید قادر به فرموله کردن مسائل انتقال جرم باشند. اگرچه روابط صرفاً تئوری و تحلیلی [۱، ۲ و ۳] در فصول اولیه ارائه می‌شوند ولی روابط نیمه‌تجربی و تجربی نیز مورد استناد هستند. بر اساس برخی از نظرسنجی‌ها از دانشجویان این درس، حجم فعلی مواد این درس کمی بیشتر از سه واحد می‌باشد. به بیان دیگر چنانچه استاد درس بخواهد ارائه مباحث درس را با درک کلاس همراه کند، معمولاً می‌بایست به توضیحات بیشتر و مبسوط‌تری پردازد. به همین دلیل در اواخر نیمسال برای اتمام مباحث مصوب دچار کمبود وقت خواهد شد. با تمام این اوصاف به دلیل پیچیدگی و ناملموس بودن درس انتقال جرم، معمولاً برای تفهیم مطالب، انرژی بیشتری صرف خواهد شد.

یک روش مؤثر برای درک بهتر مفاهیم این درس استفاده از تشابه میان پدیده‌های انتقال

ممنتوم و انتقال حرارت و انتقال جرم می باشد. چنانچه مفاهیمی همچون تشابه رینولدز - کولبورن و تشابه چیلتون - کولبورن به نحو مؤثرتری مورد استفاده قرار گیرند، به نظر می رسد تا حدودی از پیچیدگی این درس کاسته شود. از سوی دیگر پرداختن به تشابه های فوق می تواند باعث تقویت دید مفهومی گردد، به گونه ای که دانشجو به جمع بندی مشخصی از هر سه پدیده انتقال [۳] دست یافته و یک اجماع نظری از هر سه پدیده به دست آورد. اگرچه مرجع ۱ برای این درس بلامنازع می باشد ولی مراجع ۲ و ۳ در بیان مفهوم ضرایب انتقال جرم مفیدتر هستند.

یکی دیگر از روش های مؤثر برای آموزش مفاهیم این درس استفاده از نرم افزارهای کمک آموزشی است که همراه کتب و مراجع جدید این درس به صورت CD عرضه می شود. استفاده از جنبه های بصری در آموزش مفاهیم پیچیده ای این درس کمک قابل توجهی به ملموس بودن آن می کند. همچنین در صورت امکان می توان با دادن پروژه های درسی که در آن مفاهیم اصلی این درس به صورت گرافیکی و با کمک نرم افزارهای تخصصی (چون Macro Media Flash) متحرک سازی (انیمیشن) شده و به تصویر کشیده شوند، نیز در درک هرچه بهتر آن مفید باشد.

لازم به توضیح است که رعایت توازن در بیان ریاضی مسائل انتقال جرم و استفاده از روابط تجربی، با توجه به ارائه عمیق تر روابط انتقال جرم در درس انتقال جرم پیشرفته در دوره کارشناسی ارشد، بسیار ضروری است. به نظر می رسد چنانچه در دوره کارشناسی بیشتر تأکید بر تعمیق مفاهیم درس بوده و در عین حال این آموزش همراه با ارائه مثال های متنوع کاربردی - عملیاتی باشد، توفیق بیشتری حاصل خواهد شد.

### ۳. فصل بندی درس

فصل اول - مقدمه ای بر انواع فرایندهای انتقال جرم و روش های جداسازی، سیستم آحاد  
فصل دوم - نفوذ مولکولی:

نفوذ در گازها و مایعات ساکن و با حرکت لایه ای پایا، ضرایب نفوذ دو و چند جزئی، محاسبه شار جرمی در نفوذ یکطرفه و متقابل، معادله پیوستگی و قوانین اول و دوم فیک  
فصل سوم - ضرایب انتقال جرم:

تعاریف، ضرایب انتقال جرم در حرکت لایه‌ای و در هم پایا، پدیده‌های انتقال در لایه مرزی جرمی، تئوری فیلمی، تشابه بین پدیده‌ها، تشابه چیلتون - کولبرن، روابط تجربی بین اعداد بدون بعد، انتقال همزمان حرارت و جرم

فصل چهارم - نفوذ در جامدات:

ضرایب نفوذ مولکولها در جامدات، نفوذ یکطرفه و متقابل

فصل پنجم - ضرایب کلی انتقال جرم:

رابطه بین ضرایب انتقال جرم در دو سوی فصل مشترک دو فاز، تعیین فاز کنترل‌کننده، محاسبه غلظت‌های تعادلی در فصل مشترک، موازنه جرم در فرایندها، غلظت توده‌گاز در فرایندهای همسو و ناهمسو، فرایندهای پیوسته و نوبتی، تعریف مرحله تعادلی و خطوط تعادل و تبادل

فصل ششم - سیستم‌های گاز - مایع:

محاسبه قطر برج‌های آکنده و سینی دار، محاسبه قطر و سرعت حباب، ضرایب انتقال جرم در دو فاز گاز و مایع، مشخصات انواع سینی و برج‌های سینی دار، محاسبه قطر، مشخصات انواع آکنده و برج‌های آکنده، موجودی مایع، بارگذاری و طغیان، محاسبه قطر برج آکنده با استفاده از GPDC.

فصل هفتم - جذب گاز:

محاسبه ارتفاع بستر آکنده، عملیات ناهمسوی چندمرحله‌ای، راندمان سینی، تعریف و محاسبه HTU و NTU و محاسبه قطر برج.

#### ۴. ارزیابی و آزمون درس

این درس قطعاً به کلاس حل تمرین نیاز دارد. تنوع مسائل مطرح شده و نیز ناملموس بودن موضوع انتقال جرم در مقایسه با پدیده‌های دیگر همچون انتقال حرارت و یا انتقال ممتوم اهمیت دوچندانی برای چنین کلاسی فراهم می‌آورد. معمولاً یک آزمون میان‌ترم و چند کوییز، کمک شایانی به ارزیابی معلومات دانشجویان خواهد کرد. در اغلب کتاب‌های جدید مسائلی که به صورت پروژه قابل اجرا باشد و عموماً هم نیاز به کامپیوتر دارد، آمده است. از این نوع پروژه‌ها می‌توان تا سقف ۱۰٪ از نمره نهایی درس نیز تخصیص داد.

توصیه می شود امتحانها به صورت کتاب باز برگزار شود. همچنین توصیه می شود بخشی از آزمون به صورت پرسش های مفهومی به صورت کتاب بسته برگزار گردد تا معلومات دانشجویان نسبت به مفاهیم عمیق درس نیز به صورت کیفی سنجیده شود. به علاوه اگرچه برای یک رشته مهندسی آزمون تستی روش نامطلوبی به شمار می آید اما می توان تعدادی تست نیز برای آمادگی آزمون کارشناسی ارشد در پایان ترم در نظر گرفت.

## ۵. نتیجه گیری

همگام با تحولات رشته های مختلف مهندسی شیمی آموزش درس انتقال جرم نیازمند روزآمد کردن مواد درسی در دوره کارشناسی است. مطالب پایه در آموزش انتقال جرم در اغلب کتاب های متن موجود است ولی نیازهای متنوع و رو به تزاید رشته مهندسی شیمی کمی افزون بر این مطالب است. همچنین با استمداد از پدیده های ملموس انتقال ممتوم و حرارت، این درس کمک شایانی به دانشجو خواهد کرد تا بتواند مسائل روزمره عملیات انتقال جرم را بررسی و محاسبه کند.

## مراجع

1. Treybal R.E., "Mass Transfer Operations", McGraw Hill, 1981.
2. Hines A.I. and Maddox R.N., "Mass Transfer: Fundamentals and Applications", Prentice Hall, 1985.
3. Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N., "Transport Phenomena", 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, 2002.

## مراجع کمکی

1. Incropera F.P. and De Witt D.P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 2<sup>nd</sup> Ed., Wiley, 1996.
2. Welty J.R., Wicks C.E. and Wilson R.E., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons, 1984.

3. Geankopolis C.J., "Transport Processes and Unit Operations", 3<sup>rd</sup> Ed.,  
Englewood Cliffs, 1990.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۲/۱۱/۳۰)