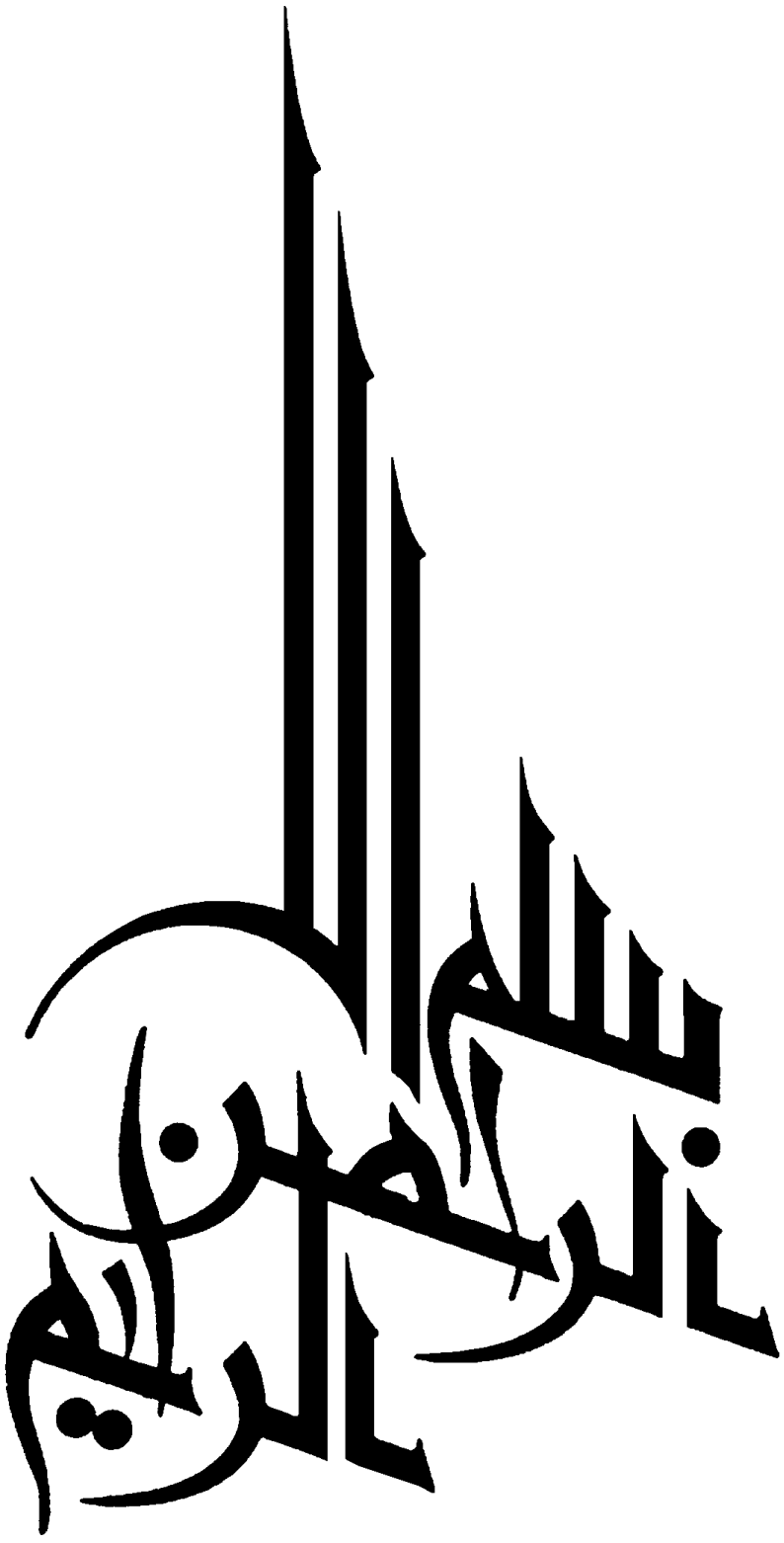

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

دانشکده مهندسی شیمی

بدست آوردن چیدمان بهینه برج‌های تقطیر

جواد ایوک‌پور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
در رشته
مهندسی شیمی- طراحی شبیه‌سازی و کنترل فرآیند

استاد راهنما:

دکتر نوراله کثیری

آبان ۸۳

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

چکیده

تعیین چیدمان بهینه برجهای تقطیر از عوامل موثر در کاهش هزینه عملیات جداسازی با تقطیر به حساب می‌آید. در این پایان نامه روشی جهت تعیین چیدمان بهینه ارایه گردیده است. برای تعیین این چیدمان بهینه ابتدا باید محدوده مورد بررسی انتخاب گردد سپس از بین حالت‌های موجود در این محدوده حالت بهینه انتخاب می‌گردد.

در این پایان‌نامه محدوده مورد بررسی حالت‌های پایه جداسازی می‌باشند و جداسازی نیز غیر کامل فرض شده است. علاوه بر آن فرض ایده‌آل بودن اجزا نیز حذف شده است. بعد از انتخاب محدوده مورد بررسی، حالت‌های مختلف ممکن تولید می‌گردند. سپس برای هر حالت طراحی کل چیدمان، به منظور رسیدن به محصولات مطلوب انجام می‌گیرد. این طراحی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی برجهای تقطیر صورت می‌گیرد. بعد از مشخص شدن این طراحی، جواب حاصل با توجه به هزینه‌های عملکرد و ساخت بهینه می‌گردد. این هزینه‌ها با استفاده از روابط موجود در مراجع محاسبه گردیده‌اند. بعد از بهینه سازی هر چیدمان، جواب بهینه شده ذخیره می‌شود و بعد از رسیدن به آخرین چیدمان، چیدمان بهینه با مقایسه هزینه‌ها مشخص می‌گردد. بنابراین جواب نهایی، علاوه بر تعیین چیدمان بهینه حاوی اطلاعات طراحی و عملکرد و همچنین تخمین هزینه چیدمان نیز می‌باشد سایر اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی برجها مانند پروفایل دما و غلظت داخل برج نیز در جواب نهایی قابل دسترسی است.

این پایان‌نامه در شش فصل تدوین گردیده است. در فصل اول چیدمان‌های مختلف ممکن برای یک جداسازی معلوم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن الگوریتمی جهت تولید چیدمان‌های ممکن برای جداسازی یک مخلوط n جزیی با فرآیند تقطیر ذکر شده است. در فصل دوم کارهای قبلی صورت گرفته جهت تعیین چیدمان بهینه و همچنین قوانین میانبر و ابتکاری موجود جهت این کار عنوان گردیده است. در فصل سوم به بررسی طراحی مقدماتی و اولیه برجهای تقطیر و روابط موجود برای تخمین هزینه‌های مربوط به فرآیند تقطیر پرداخته شده است. شبیه‌سازی برج تقطیر به روش θ موضوعی است که در فصل چهارم مورد توجه قرار گرفته است در فصل پنجم کارهای انجام گرفته در این پروژه توضیح داده شده است و بخش‌های مختلف برنامه کامپیوتری و وظیفه هر قسمت عنوان شده‌اند در فصل ششم نتایج مربوط به اجرای برنامه برای شرایط مختلف مورد برسی قرار گرفته است.

برنامه کامپیوتری به زبان C#.NET کد نویسی شده و شامل حدود شش هزار خط کد برنامه می‌باشد.

فهرست

مقدمه ۱
فصل اول : چیدمان‌های ممکن برج‌های تقطیر ۲
۱-۱- مقدمه ۳
۱-۲- چیدمانهای مختلف برای جداسازی یک مخلوط سه جزیی ۳
۱-۳- چیدمان برجهای تقطیر برای جداسازی مخلوط‌های چند جزیی ۵
۱-۴- الگوریتم بدست آوردن چیدمان‌های ممکن برای یک جداسازی ساده ۷
۱-۵- ساختارهای پایه چیدمان برجها ۹
۱-۶- روشی برای رسم ساختار تقطیر پایه ۱۱
۱-۷- جمعبندی از روش گفته شده ۲۵
۱-۸- تفسیر تعداد حالت‌های پایه ممکن ۲۹
۱-۹- بدست آوردن زوج‌های حرارتی معادل تقطیر پایه ۳۱
۱-۱۰- ساختارهای تقطیر گوناگون ۳۵
۱-۱۱- جمعبندی ۳۵
فصل دوم : روش‌های انتخاب چیدمان بهینه ۳۷
۲-۱- مقدمه ۳۸
۲-۲- روشهای ابتکاری ۳۸
۲-۳- روش‌های تکاملی ۴۱
۲-۴- روشهای الگوریتمی ۴۳
۲-۴-۱- روشهای آماری ۴۳
۲-۴-۲- روشهای انشعاب و انسداد ۴۴
۲-۴-۳- روشهای فازی ۴۴
۲-۴-۴- روشهای برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی ۴۵
۲-۴-۵- الگوریتم ژنتیک ۴۵
۲-۴-۶- روش ماتریسی ۴۶
۲-۴-۷- روش نیروی محرکه ۴۷
۲-۵- قوانین ابتکاری در چیدمان برجهای تقطیر ۴۹
۲-۶- جمعبندی ۵۳
فصل سوم : محاسبه ابعاد و تخمین هزینه ها درفرآیند تقطیر ۵۴
۳-۱- مقدمه ۵۵
۳-۲- طراحی فرآیند تقطیر ۵۵
۳-۲-۱- ارتفاع برج ۵۵
۳-۲-۲- قطر برج ۵۵
۳-۲-۳- سطح انتقال حرارت لازم در ریبویلر و کندانسور ۵۷
۳-۳- هزینه‌های مربوط به فرآیند تقطیر ۵۷
۳-۳-۱- هزینه‌های ساخت ۵۷
۳-۳-۱-۱- قیمت ساخت بدنه برج ۵۸
۳-۳-۱-۲- قیمت سینی‌ها ۵۹
۳-۳-۱-۳- هزینه ساخت ریبویلر و کندانسور ۵۹

۳-۳-۲- هزینه‌های عملکرد ۶۰
۳-۳-۲-۱- هزینه عملکرد ریبویلر ۶۰
۳-۳-۲-۲- هزینه عملکرد کندانسور ۶۱
۳-۳-۳- هزینه کل ۶۱
۳-۴- جمعبندی ۶۲
فصل چهارم : شبیه سازی برج تقطیر به روش θ ۶۳
۴-۱- مقدمه ۶۴
۴-۲- شبیه سازی برج تقطیر ساده به روش همگرایی θ ۶۴
۴-۲-۱- معادلات موازنه جرم جزئی برای برجهای ساده ۶۷
۴-۲-۲- فرمول‌بندی "روش همگرایی θ" برای برج‌های ساده ۷۰
۴-۲-۳- مقادیر تصحیح شده جزء مولی برای برجهای ساده ۷۱
۴-۲-۴- "روش K_b " برای برجهای ساده ۷۱
۴-۲-۵- "روش غلظت ثابت" برای برجهای ساده ۷۲
۴-۲-۶- خلاصه روش شبیه سازیθ ۷۳
۴-۳- شبیه سازی برج تقطیر پیچیده به روش همگرایی θ ۷۴
۴-۳-۱- معادلات موازنه جرم جزئی برای برجهای پیچیده ۷۴
۴-۳-۲- فرمول‌بندی "روش همگرایی θ" برای برج‌های پیچیده ۷۶
۴-۳-۳- مقادیر تصحیح شده جزء مولی برای برجهای پیچیده ۷۸
۴-۳-۴- "روش K_b " برای برجهای پیچیده ۷۸
۴-۳-۵- "روش غلظت ثابت" برای برجهای پیچیده ۷۹
۴ -۴- جمعبندی ۷۹
فصل پنجم : مراحل تعیین چیدمان بهینه ۸۰
۵-۱- مقدمه ۸۱
۵-۲- بخش اول؛ زیر برنامه شبیه‌سازی برج تقطیر ۸۲
۵-۲-۱- الگوریتم حدس اولیه دمای سینی‌ها ۸۲
۵-۲-۲- الگوریتم حدس اولیه شدت جریان‌های کلی ۸۳
۵-۳- بخش دوم: زیربرنامه تولید چیدمان‌های مختلف ۸۳
۵-۴- بخش سوم؛ زیر برنامه طراحی ۸۶
۵-۵- بخش چهارم؛ زیر برنامه تخمین قیمت ۹۱
۵-۶- بخش پنجم: زیربرنامه بهینه‌سازی ۹۱
۵-۷- بخش ششم؛ قسمت اصلی برنامه ۹۴
۵-۸- نکاتی راجع به برنامه نوشته شده ۹۴
۵-۹- جمعبندی ۹۵
فصل ششم : نتایج ۹۷
۶-۱- مقدمه ۹۸
۶-۲- نتایج اجرای برنامه ۹۸
۶-۳- مطالبی کلی راجع به برنامه ۱۱۴
۶-۴- جمعبندی ۱۱۵
جمعبندی و پیشنهادات ۱۱۶
منابع و مراجع ۱۲۱

واژه نامه

آزئوتروپ	Azeotrope
آماری	Statistic
ابتکاری	Heuristic
اختلاط مجدد	Remixing
ارتفاع	Height
اقماری	Satellite
الگوریتم	Algorithm
الگوریتم ژنتیک	Genetic Algorithm
بار گرمایی	Heat duty
نوبتی	Batch
برج	Column
برج مرکب	Complex Column
برج متعارف	Conventional Column
برگشت کامل	Total Reflux
پارامتر جریان	Flow Parameter
پایه	Basic
تأثیر متقابل	Double Effect
تکاملی	Evolutionary
تمام زوج حرارتی	Fully Thermally Coupled
جریان برگشتی	Reflux Flow
جریان جانبی	Side Stream
جزء کلیدی	Key Component
جزء مولی	Mole Fraction
چیدمان	Sequencing
دیواره تقسیم	Dividing Wall
ریشه	Root
روش انشعاب و انسداد	Branch and Bond Method
زوج حرارتی	Thermally Coupled
سطح خالص	Net Area

سینی	Tray
شاخه بالایی	Upper Branch
شاخه پایینی	Lower Branch
شبکه	Network
شبکه کامل	Complete Network
طغیان	Flooding
عاری‌ساز	Stripper
عاری سازی	Stripping
عمق	Depth
غنی‌ساز	Rectifier
غنی‌سازی	Rectifying
غیر مستقیم	Indirect
فازی	Fuzzy
فراریت	Volatility
فراریت نسبی	Relative Volatility
قسمت برج	Column Section
قسمت تقطیر	Distillation Section
قوانین سرانگشتی	Rules of Thumb
کنار گذر	By-passing
گره	Node
محصول بالایی	Top Product
محصول پایینی	Bottom Product
محصول میانی	Intermediate Product
مستقیم	Direct
مخلوط نمودن	Blending
میانبر	Short-Cut
ناودان	Downcomer
نیروی محرکه	Driving Force
هزینه کل سالیانه	Total Annual Cost

مقدمه

فرآیندهای جداسازی یکی از مهمترین قسمتها در فرآیندهای شیمیایی می‌باشند و متداولترین آنها تقطیر می‌باشد در برخی موارد از چند مرحله تقطیر پشت سرهم برای تفکیک یک محلول به چند محصول استفاده می‌گردد در این صورت تعیین ترتیب جداسازی‌ها و چگونگی عملکرد هر واحد تقطیر نقش اساسی در مقدار هزینه‌های مربوط به جداسازی دارا می‌باشد.

براین اساس، در دهه‌های گذشته کارهای فراوانی جهت ارایه روشی برای تعیین چیدمان بهینه برجهای تقطیر صورت گرفته است. اولین کارهای صورت گرفته در این زمینه به دهه ۴۰ میلادی برمی‌گردد که غالباً معطوف به جداسازی‌های سه جزئی شده‌اند. بعد از آن نیز با در نظر گرفتن حالتهای پیچیده‌تر سعی در ارایه روشهای جامع‌تر و کلی‌تر برای انتخاب چیدمان بهینه شده است. با این وجود اغلب کارهای انجام گرفته، جداسازی‌های کامل را مد نظر قرار داده‌اند و در اغلب آنها ترکیبات ایده‌آل فرض شده‌اند. علاوه بر آن در بیشتر کارهای انجام گرفته از روشهای میانبر جهت تعیین مشخصات هندسی برجها و تخمین قیمت استفاده گردیده است. فرض مجاور بودن اجزای کلیدی نیز از دیگر فرضیات بکار گرفته شده است که دامنه جستجو را به طرز چشمگیری کاهش می‌دهد.

علاوه بر ترتیب جداسازی‌ها و چگونگی چیدمان، ساختارهای دیگری نیز در کاهش هزینه چیدمانها مؤثری باشد. در برخی از کارهای صورت گرفته به تأثیر این پارامترها پرداخته شده است. بعنوان مثال در نظر گرفتن حالتهای زوج حرارتی، تأثیر متقابل، حالتهای معادل ترمودینامیکی و ساخت برج تقطیر با دیوارهٔ تقسیم، دامنه جستجو چیدمان بهینه را گسترش می‌دهند.

از برخی از نتایج حاصل از کارهای انجام گرفته بر روی چیدمان برجهای تقطیر، برای سایر فرآیندهای جداسازی نیز می‌توان استفاده نمود.

ارزش روزافزون انرژی، ارایه روشهای جدید بهینه یابی و بالا رفتن سرعت کامپیوترها باعث شده است که بحث انتخاب چیدمان بهینه برجهای تقطیر همچنان یکی از بحثهای مورد توجه محققین به حساب آید.

فصل اول :

چیدمان‌های ممکن برجهای تقطیر

۱-۱- مقدمه

برای تعیین چیدمان بهینه برجهای تقطیر برای یک جداسازی مشخص ابتدا باید حالت‌های مختلف ممکن برای این جداسازی مشخص شوند. با وجود کارهای زیادی که برای بدست آوردن حالت‌های ممکن جداسازی یک مخلوط n جزیی صورت گرفته است، هنوز روش کامل و جامعی برای بدست آوردن تمامی حالت‌های ممکن ارایه نگردیده است. اغلب کارهای انجام شده برای بدست آوردن بهترین چیدمان برجهای تقطیر، از یک الگوریتم مشخص برای سنتز و بدست آوردن چیدمان‌های ممکن استفاده می‌کنند. این الگوریتم‌ها غالباً شامل چندین فرض ساده شونده هستند، بنابراین تمامی حالت‌های ممکن را ارایه نمی‌دهند. با اینحال می‌توان حالت بهینه را از بین حالت‌های ساده مورد بررسیا، بدست آورد و سپس با حذف فرضهای اولیه حالت بهینه بدست آمده را بهبود بخشید. اغلب این الگوریتم‌ها برای مخلوط‌های ایده‌آل و یا نزدیک به ایده‌آل می‌باشند، با این وجود برخی از الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن حالت‌های غیرایده‌آل و حالت‌های آزئوتروپی امکان بدست آوردن چیدمان بهینه در این قبیل مخلوطها را نیز فراهم می‌سازند.

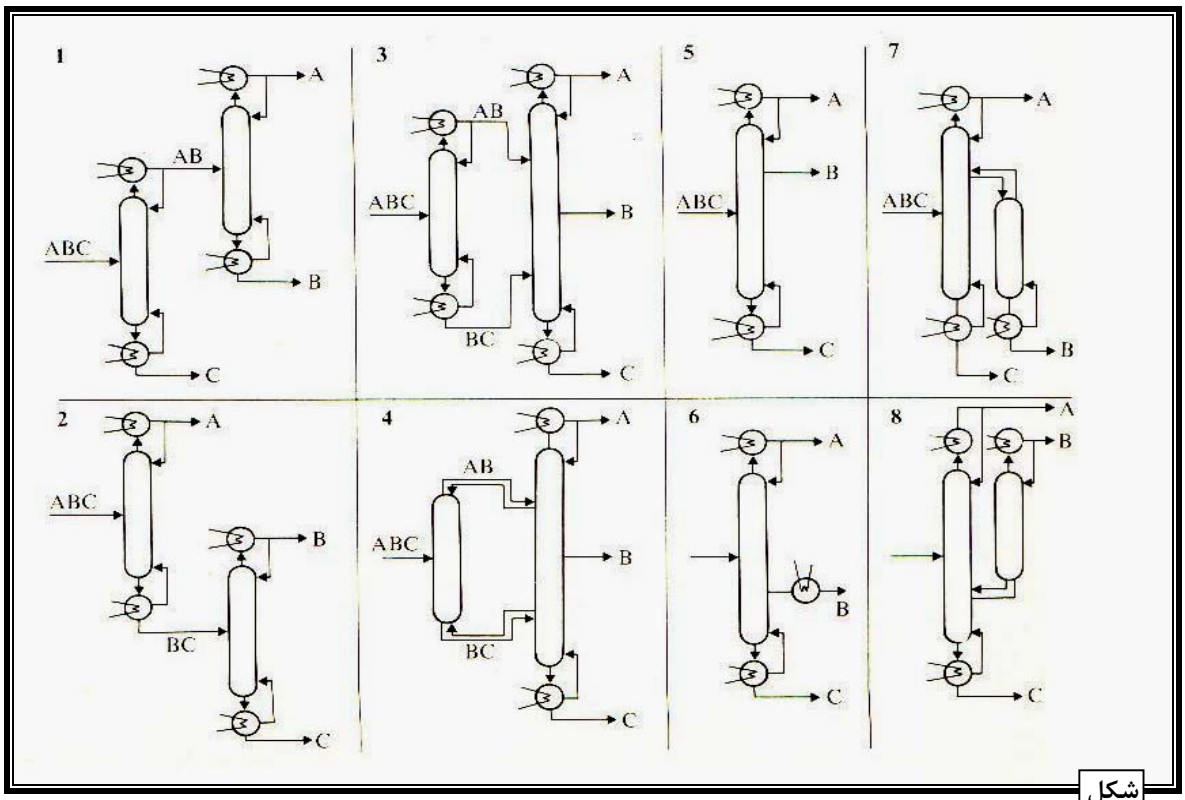
در این فصل ابتدا چیدمان‌های مختلف برای یک جداسازی سه جزیی ارایه می‌گردد. سپس یک الگوریتم مناسب جهت بدست آوردن چیدمان‌های ساده ممکن یک جداسازی n جزیی که توسط Agrawal ارایه گردیده است، آورده می‌شود.

۱-۲- چیدمانهای مختلف برای جداسازی یک مخلوط سه جزیی

شکل ۱-۱ هشت حالت مختلف را برای جداسازی یک مخلوط سه جزیی غیر آزئوتروپی به سه محصول تقریباً خالص نشان می‌دهد[۱]. در حالت‌های ۱ و ۲، ابتدا یکی از اجزا از مخلوط سه جزیی در برج اول جدا می‌شود و سپس برج دوم عمل جداسازی مخلوط دو جزیی را انجام می‌دهد. حالت۳، حالتی است که در آن ابتدا مخلوط سه جزئی به دو محصول دو جزیی که هر کدام مخلوطی از جزء سبک‌تر یا سنگین‌تر به همراه محصول میانی است، تفکیک می‌گردد، سپس دو محصول حاصل وارد قسمت‌های مختلفی از برج دوم می‌گردد، محصول برج دوم، سه جریان تقریباً خالص از اجزاء مخلوط اولیه می‌باشد. در این حالت جزء میانی از وسط برج دوم گرفته می‌شود (می‌توان هر یک از محصولات دو جزیی برج اول را در یک برج جداگانه نیز تفکیک نمود که این حالت نشان داده نشده است.). محصول میانی B را می‌توان با هر مقدار خلوص که لازم باشد، بدست آورد. این سه حالت گفته شده در بالا، سه حالت شناخته شده در جداسازی مخلوط‌های چند جزیی می‌باشند، حالت اول که در آن محصولات سنگین‌تر به ترتیب از پایین برج‌های متوالی گرفته می‌شوند و تنها سبک‌ترین محصول از کندانسور برج آخر

بدست می‌آید، به ساختار غیر مستقیم موسوم است. حالت دوم که در آن محصولات به ترتیب فراریت از کندانسور برجهای متوالی گرفته می‌شوند و فقط سنگین‌ترین جزء از ریبویلر برج آخر بدست می‌آید، به ساختار مستقیم موسوم است. و ساختار حالت سوم که شامل یک جداسازی مقدماتی است و سپس هر سه محصول از برج دوم گرفته می‌شوند، به ساختار جداسازی مقدماتی موسوم می‌باشد.

حالت۴ در واقع معادل حالت ۳ است، با این تفاوت که در این حالت ریبویلر و کندانسور برج اول حذف شده و به جای آن یک تبادل جریان دو طرفه بین دو برج برقرار است. این دو جریان از محل مشابه از دو برج می‌باشند و یکی از آنها به صورت مایع است و دیگری به صورت بخار و در جهت مقابل هم در جریان هستند. این حالت در اصطلاح زوج حرارتی نامیده می‌شود. در حالت‌های ۵ و ۶ هر سه محصول از یک برج گرفته می‌شوند و محصول میانی به صورت جریان جانبی می‌باشد، اگر این جریان جانبی از بالای سینی خوراک گرفته شود (حالت۵) بهتر است به صورت مایع باشد زیرا غلظت محصول میانی B نسبت به جزء فرارتر A در فاز مایع بیشتر است و اگر از پایین سینی خوراک گرفته شود(حالت۶) بهتر است به صورت بخار باشد. در هر دو حالت گفته شده ۵ و ۶، امکان بدست آوردن محصول میانی به صورت تقریباً خالص میسر نمی‌باشد و محصول میانی همراه با مقداری از جزء دیگر می‌باشد. به منظور خالص نمودن محصول میانی می‌توان از ساختارهای نشان داده شده در حالت‌های ۷ و ۸ استفاده نمود. در حالت ۷ یک عاری ساز جریان جانبی غلظت محصول B در جریان جانبی را افزایش می‌دهد و در حالت ۸، یک غنی ساز جریان جانبی این عمل را انجام می‌دهد.



شکل ۱-۱ ساختارهای مختلف ممکن برای یک جداسازی سه جزیی[۱]

مطالعات زیادی بر روی حالت‌های مختلف گفته شده صورت گرفته است. از روی این مطالعات مشخص است که حالت ۵ برای حالتی که مقدار A خیلی کم است و یا وجود مقداری A در جریان B زیاد مهم نباشد، ترجیح داده می‌شود. به طور مشابه اگر مقدار C خیلی کم بوده و یا وجود مقداری C در جریان B قابل قبول باشد، حالت۶ انتخاب می‌گردد. جداسازی مقدماتی و یا زوج حرارتی برای حالتی که مقدار B زیاد باشد، مناسب می‌باشند. در صورتیکه مقدار B خیلی زیاد نباشد، می‌توان از حالت‌های۷ و ۸ استفاده نمود. حالت۷ به ویژه هنگامیکه مقدار A کمتر از مقدار C است مناسب می‌باشد و حالت ۸ موقعیکه مقدار A بیشتر از C باشد انتخاب می‌شود. این دو حالت قابل مقایسه با دو حالت ۱ و ۲ می‌باشند (حالت ۱ برای حالتیکه C خیلی از A بیشتر است و حالت۲ وقتیکه C کمتر و یا تقریباً برابر A است.) [۱].

۱-۳- چیدمان برجهای تقطیر برای جداسازی مخلوط‌های چند جزیی

برای تعداد بیشتر اجزا نیز مطالعاتی صورت گرفته که بیشتر آنها معطوف به حالت‌های ساده می‌گردد. که در آنها جریان جانبی وجود ندارد و هر برج برای جداسازی دو جزء کلیدی مجاور استفاده می‌گردد. با این وجود تعداد حالت‌های ممکن بسیار زیاد خواهد بود.

حالت ساده‌ای را در نظر بگیرید که هر برج شامل یک خوراک است و آن را به دو جریان محصول بالایی و محصول پایینی تفکیک می‌کند، علاوه بر این دو جزء کلیدی جداسازی مجاور هم می‌باشند، و جداسازی نیز کامل فرض می‌شود. در اینصورت اگر خوراک اولیه شامل n جزء باشد، برای جداسازی خوراک به n محصول خالص n-1 برج لازم می‌باشد. می‌توان یک معادله جهت محاسبه تعداد حالت‌های ممکن بدست آورد. در برج اول می‌توان j جزء را در جریان بالایی و n-j جزء را در جریان پایینی داشت. اگر تعداد حالت‌های ممکن برای جداسازی یک خوراک n جزیی S_{n-j} باشد، S_j حالت برای جداسازی محصول بالای برج و S_{nj} حالت برای جداسازی محصول پایین برج ممکن می‌باشد. بنابراین تمام حالت‌های ممکن از رابطه زیر بدست می‌آید[۱]:

$$S_n = \sum_{j=1}^{n-1} S_j S_{n-j} \qquad (۱-۱)$$

با توجه به اینکه $S_1=1$ و $S_2=2$، S_n قابل محاسبه است. تعداد حالت‌های ممکن محاسبه شده از این فرمول برحسب تعداد اجزا خوراک در جدول ۱-۱ آمده است. فرم بسته معادله فوق به صورت زیر است:

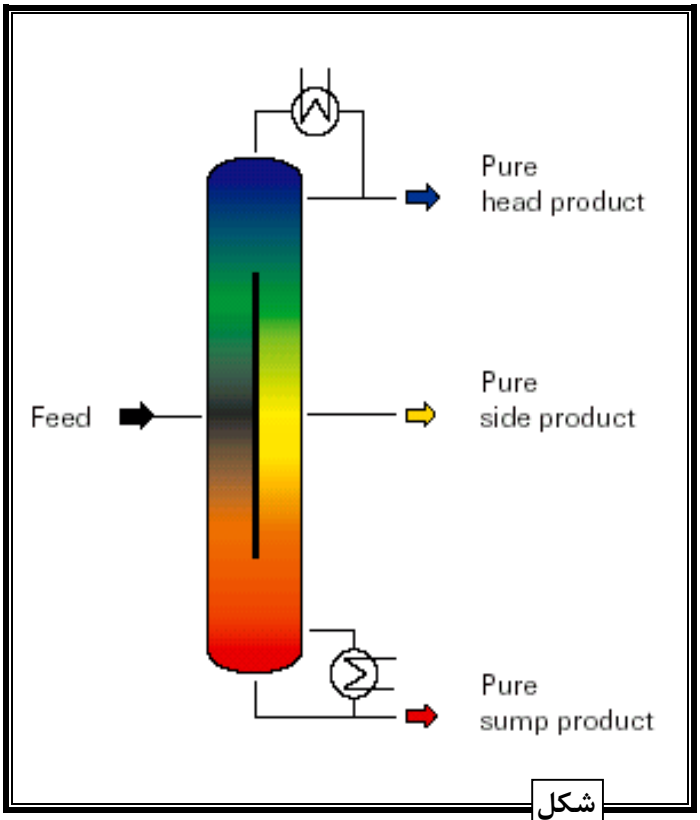
$$S_n = \frac{[2(n-1)]!}{n!(n-1)!} \qquad (۱-۲)$$

Products	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Column Sequences S_R	1	2	5	14	42	132	429	1430	4862	16796

جدول ۱-۱ تعداد ساختارهای ممکن چیدمان برجها برحسب تعداد اجزا خوراک

حالت‌های پیچیده‌تر فراوانی علاوه بر آنچه در این قسمت آمد، ممکن است در نظر گرفته شود. به عنوان مثال یک ساختار معادل ساختار جداسازی مقدماتی در شکل ۱-۲ آمده است. در این ساختار از یک برج به جای دو برج مجزا استفاده می‌شود و با استفاده از یک دیواره عمودی موسوم به دیواره تقسیم، بخش میانی برج به دو قسمت تقسیم می‌شود. هزینه ساخت این برج حدود ۳۰ درصد کمتر از هزینه ساخت دو برج پشت سرهم است.

پدیده قابل توجه دیگری که در برجهای تقطیر چند جزیی اتفاق می‌افتد پدیده اختلاط مجدد است. در این حالت غلظت جزء میانی در میانه‌های برج به حداکثر مقدار خود می‌رسد، یعنی اگر جزء B در یک محلول سه جزیی ABC در نظر گرفته‌شود، در بالای برج، غلظت A زیاد و غلظت B و C کم است، با حرکت به سمت پایین برج از غلظت A کاسته شده و غلظت B و C افزایش می‌یابد. با حرکت بیشتر به سمت پائین برج افزایش غلظت C از افزایش غلظت B پیشی می‌گیرد. سرانجام در پایین برج غلظت B و A کم بوده در حالیکه غلظت C زیاد می‌باشد. در این حالت غلظت جزء B در میانه‌های برج به ماکزیمم مقدار خود رسیده است. در صورتیکه جریان جانبی حاوی مقدار زیادی B مطلوب باشد، بهترین موقعیت برای خارج نمودن این محصول، جایی است که مقدار B به ماکزیمم خود رسیده است [۲].



شکل ۱-۲ برج تقطیر همراه با دیواره تقسیم[۲]

۱-۴- الگوریتم بدست آوردن چیدمان‌های ممکن برای یک جداسازی ساده

با وجود کارهای زیادی که برای بدست آوردن تمام ساختارهای ممکن جداسازی یک مخلوط n جزیی صورت گرفته است، هنوز روش کامل و جامعی که تمامی ساختارهای ممکن را پوشش دهد، ارایه نگردیده است. با اینحال روشهای مختلفی برای بدست آوردن چیدمانهای مختلف همراه با یک سری فرضیات ساده شونده ارایه گردیده است. مزیت این الگوریتم‌ها بدست آوردن چیدمان‌های ممکن برای جستجوی حالت بهینه است. یکی از این روشها، الگوریتمی است که توسط Agrawal ارایه گردیده است. این الگوریتم تنها به بررسی مخلوط‌های ایده‌آل و یا نزدیک به ایده‌آل می‌پردازد. چیدمانهای مورد بررسی در این روش به دو گروه کلی تقسیم می‌گردند؛ ۱- پایه و ۲- زوج حرارتی [۳ و ۴].

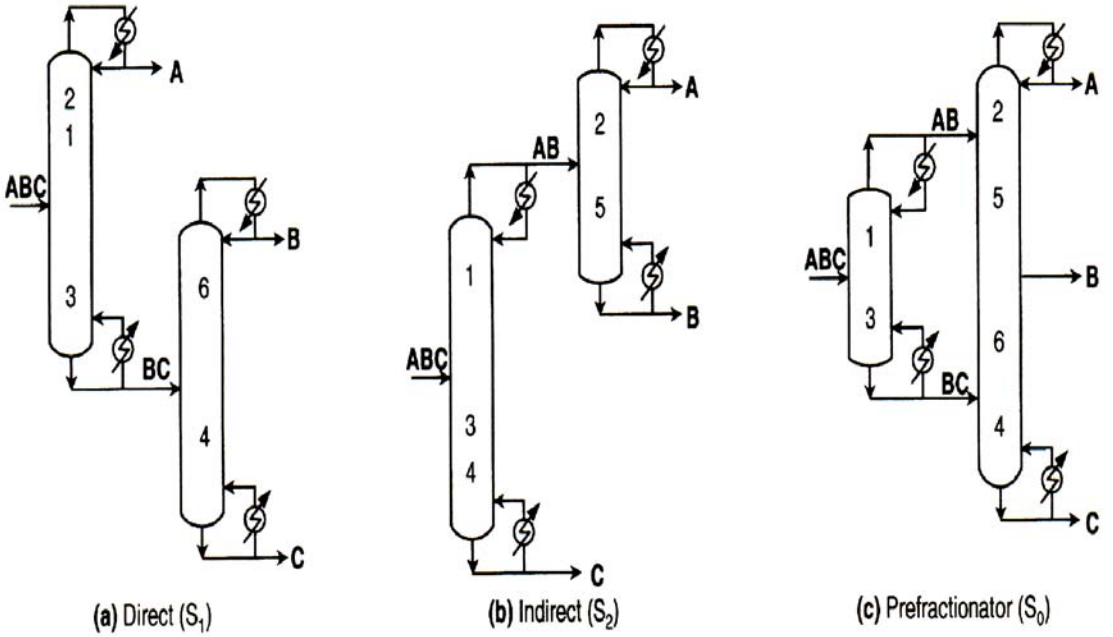
در حالت پایه هر برج دارای یک ریبویلر در پایین و یک کندانسور در بالا می‌باشد. حالت زوج حرارتی با جایگزین کردن یک یا چند کندانسور و یا ریبویلر حالت پایه، با جریان متقابل بین دو برج بدست می‌آید. علاوه بر این امکان جایگزینی یک جریان یک طرفه با جریان متقابل دو طرفه برای رسیدن به ساختار زوج حرارتی نیز وجود دارد. در این تبادل متقابل هنگامیکه جریان بخار از یک برج به برج دیگر فرستاده می‌شود، جریان مایع از برج دیگر و از موقعیت یکسان با جریان بخار به برج اول وارد می‌شود.

در این الگوریتم فرض بر این است که یک خوراک n جزیی به n محصول تقریباً خالص تک جزیی توسط n-1 برج تفکیک می‌گردد. علاوه بر این اگر یک مخلوط شامل ترکیب مشخصی از اجزا، برج را ترک کند، دیگر به برج اولیه بازگردانده نمی‌شود. ولی امکان گرفتن بیش از ۲ محصول از یک برج و یا داشتن بیش از یک خوراک برای یک برج وجود دارد. علاوه بر این، محصول نهایی که غنی از یک جزء مشخص باشد فقط یک بار تولید می‌گردد. محصولات نهایی مشابه که غنی از یک جزء مشخص هستند و از دو برج متفاوت بدست می‌آیند در این الگوریتم در نظر گرفته نشده‌اند.

شکل ۱-۳ تمام حالت‌های ممکن برای جداسازی یک ترکیب سه تایی را با در نظر گرفتن فرضیات بالا نشان می‌دهد. در این شکل و همچنین در موارد دیگر، ترکیبات برحسب میزان فراریت نسبی نامگذاری شده‌اند، A فرارترین ماده و C سنگین‌ترین ماده در ترکیب ABC می‌باشند.

شکل ۱-۴ تمام حالت‌های ممکن برای جداسازی زوج حرارتی یک خوراک سه جزیی را نشان می‌دهد. برای هر ترکیب n جزیی می‌توان نشان داد که ساختارهای عاری‌ساز جانبی و غنی‌ساز جانبی را می‌توان با جایگزین کردن ریبویلر و یا کندانسور با یک تبادل متقابل جریان(ساختار زوج حرارتی) در حالت‌های پایه بدست آورد.برای مثال ساختار ترمودینامیکی غنی‌ساز شکل ۱-۴-a را می‌توان با حذف ریبویلر BC در شکل ۱-۳-a و جایگزین کردن یک تبادل دو طرفه زوج حرارتی به جای آن بدست آورد. سایر ساختارهای زوج حرارتی دیگر نیز به طور مشابه

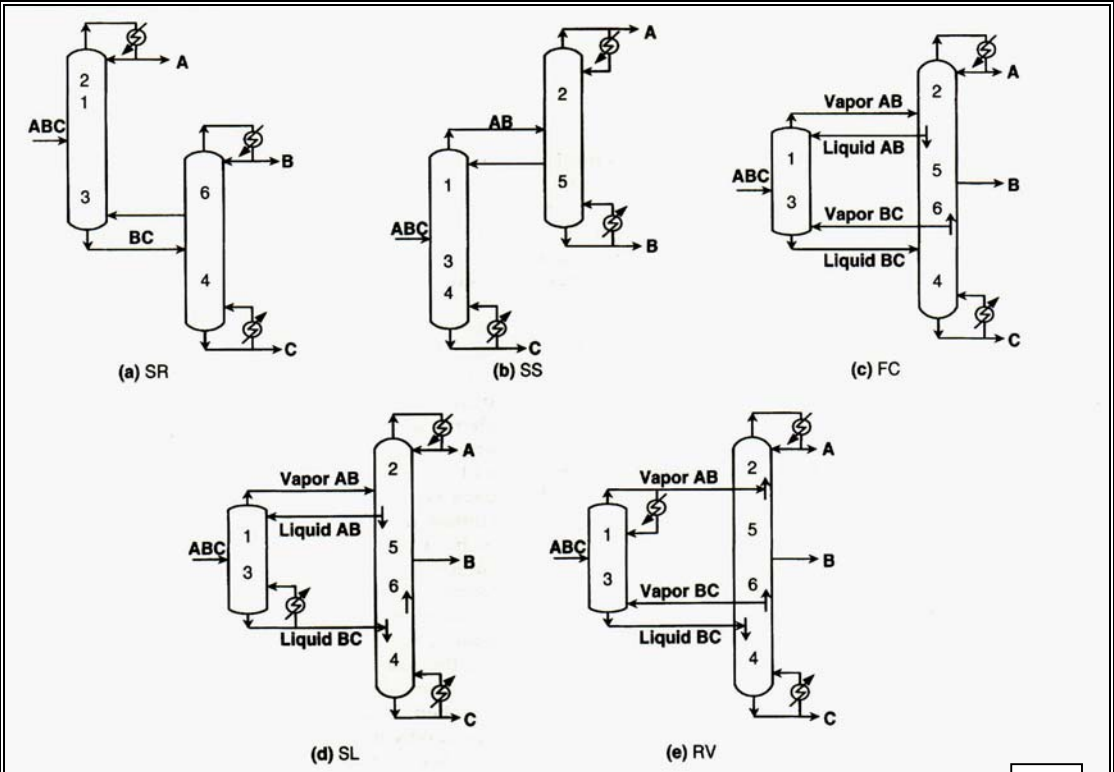
بدست می‌آیند[۵، ۶، ۷،۸و۹].



شکل ۱-۳ حالت‌های ممکن جداسازی پایه یک ترکیب سه جزیی[۳]

بعد از آنکه حالت‌های مختلف زوج حرارتی بدست آمد، می‌توان به راحتی تمام حالت‌های معادل ترمودینامیکی آن را نیز بدست آورد. [۵].

این کار با انتقال دادن یک بخش تقطیر از یک برج به برج دیگر امکانپذیر است. برای مثال ساختار عاری ساز جانبی شکل ۱-۴-a را می‌توان با انتقال دادن بخش۴ و ریبویلر مربوط به محصول C به انتهای بخش۳ بدست آورد. این ساختار جدید بدست آمده از لحاظ ترمودینامیکی معادل همان شکل ۱-۴-a می‌باشد و هر دو نیاز به بار گرمایی یکسان دارند. بنابراین هنگام جستجو برای پیدا کردن چیدمان بهینه می‌توان فضای جستجو را با حذف ساختارهای معادل ترمودینامیکی کوچکتر نمود و این موضوع اغلب به کاهش قابل توجهی در فضای جستجو منتهی می‌شود. با وجود آنکه بار گرمایی هر دو ساختار معادل ترمودینامیک، یکسان می‌باشد ولی تفاوت بین ارتفاع و همچنین قطر برج‌ها می‌تواند سبب اختلاف قیمت ساخت گردد که باید به آن نیز توجه نمود. یک روش اینست که ابتدا چیدمان بهینه از بین ساختارهای پایه و زوج حرارتی انتخاب گردیده و سپس بین ساختارهای معادل ترمودینامیکی با ساختار بهینه بدست آمده، بهترین ساختار ممکن انتخاب گردد.



شکل ۱-۴ حالت‌های ممکن جداسازی زوج حرارتی یک ترکیب سه جزیی[۳]

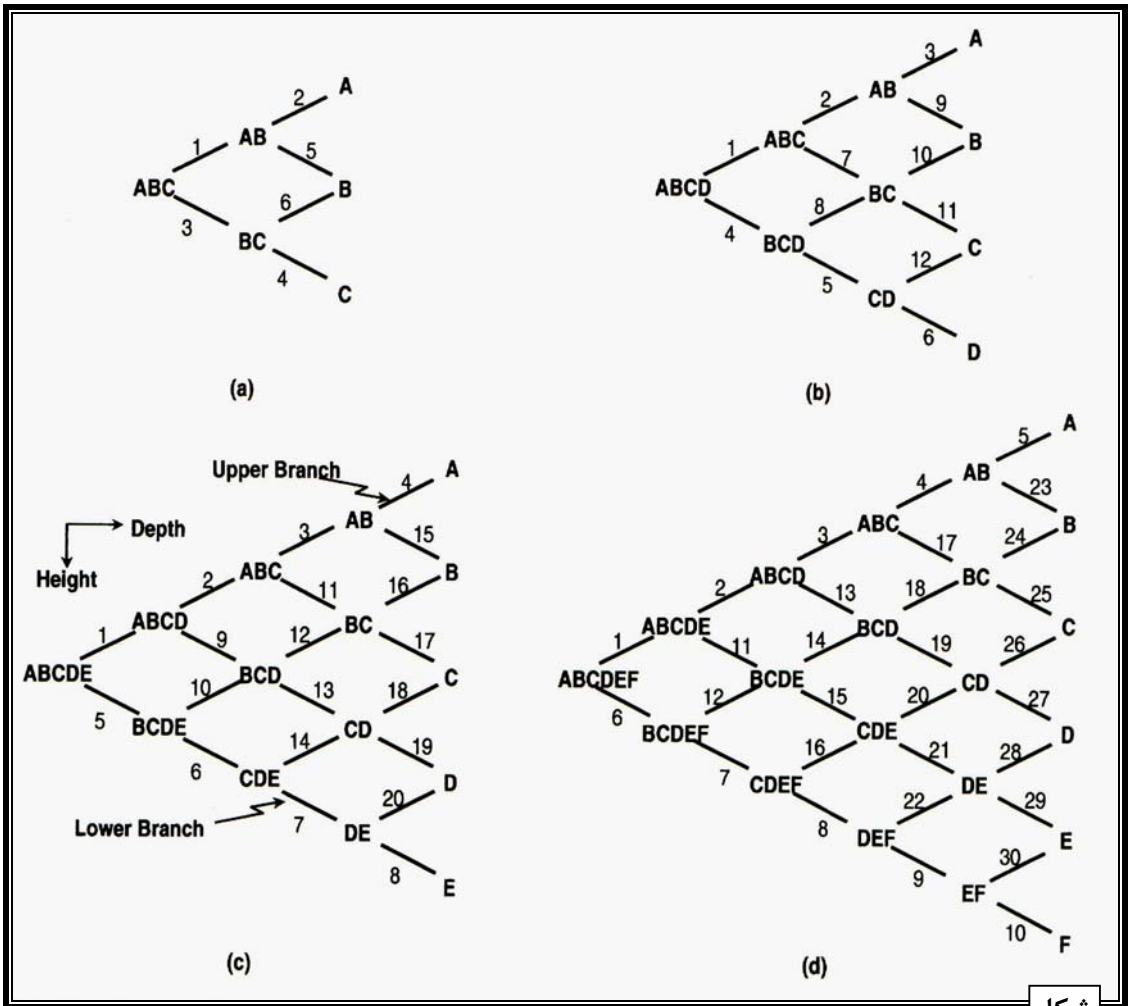
۱-۵- ساختارهای پایه چیدمان برجها

در این قسمت روشی برای بدست آوردن تمامی ساختارهای پایه ممکن برای جداسازی یک مخلوط n جزیی ارایه می‌گردد. در اینجا همانطور که قبلاً نیز گفته شد، فقط مخلوط‌ها ایده‌آل مورد بررسی قرار می‌گیرند. هر برج دارای یک ریبویلر و یک کندانسور است و از n-1 برج برای جداسازی یک مخلوط n جزیی استفاده شده است. استفاده از کندانسور یا ریبویلر برای محصولات جانبی مجاز نمی‌باشد.

برای بدست آوردن تمام ساختارهای ممکن از شکلهای شبکه‌ای استفاده شده است. شکل ۱-۵ بیان شبکه‌ای برای جداسازی یک مخلوط سه، چهار، پنج و شش جزیی را نمایش می‌دهد. در هر یک از شبکه‌ها، مخلوط نشان دهنده خوراک در ریشه شبکه وجود دارد و هر یک از گره‌های نهایی نشان دهنده یک محصول مشخص می‌باشد. مخلوط‌های موجود در گره‌های میانی، مخلوط‌های ممکن از خوراک می‌باشند و بیانگر جریانی‌هایی هستند که از یک برج به برج دیگر منتقل می‌شوند تا مورد جداسازی بیشتر قرار گیرند. هر خط که دو گره را به هم متصل می‌کند بیانگر یک قسمت تقطیر می‌باشد. یک شبکه کامل مطابق شکل ۱-۵ شامل $n(n+1)/2$ مخلوط شامل خود خوراک و $n(n-1)$ بخش تقطیر می‌باشد.

موقعیت یک مخلوط در شبکه با دو مقدار ارتفاع و عمق آن بدست می‌آید. موقعیت ریشه یا گره خوراک در عمق یک می‌باشد در حالیکه موقعیت محصولات در شکل‌های ۱-۵ در عمق n می‌باشد.

همچنین در ساختارهای نشان داده شده در شکل ۱-۵ (که تنها یک ساختار ممکن برای هر جداسازی می‌باشند) هر مخلوطی در عمق m دارای (n-m+1) جزء می‌باشد. شاخه بالایی در شبکه شامل تمامی مخلوط‌هایی است که حاوی جزء فرارتر A می‌باشند و شاخه پایینی حاوی تمام مخلوط‌هایی است که شامل جزء سنگین‌تر خوراک می‌باشند. در حالیکه محصولات میانی ممکن است در مخلوط‌های میانی شبکه یافت شوند. واژه محصول میانی بیانگر محصولی با فراریت متوسط است (بین سنگین‌ترین و سبک‌ترین جزء). در یک عمق مشخص، ارتفاع یک مخلوط از شاخه بالایی سنجیده می‌شود. یعنی در عمق m، مخلوط موجود روی شاخه بالایی دارای ارتفاع یک و مخلوط موجود روی شاخه پایینی دارای ارتفاع m است. به این ترتیب موقعیت هر یک از مخلوط‌ها را می‌توان با دو عدد نشان داد.



شکل ۱-۵ بیان شبکه‌ای جداسازی یک مخلوط چند جزیی[۳]

همچنین در ساختارهای نشان داده شده در شکل ۱-۵ (که تنها یک ساختار ممکن برای هر جداسازی می‌باشند) هر مخلوطی در عمق m دارای (n-m+1) جزء می‌باشد. شاخه بالایی در شبکه شامل تمامی مخلوط‌هایی است که حاوی جزء فرارتر A می‌باشند و شاخه پایینی حاوی تمام مخلوط‌هایی است که شامل جزء سنگین‌تر خوراک می‌باشند. در حالیکه محصولات میانی ممکن است در مخلوط‌های میانی شبکه یافت شوند. واژه محصول میانی بیانگر محصولی با فراریت متوسط است (بین سنگین‌ترین و سبک‌ترین جزء). در یک عمق مشخص، ارتفاع یک مخلوط از شاخه بالایی سنجیده می‌شود. یعنی در عمق m، مخلوط موجود روی شاخه بالایی دارای ارتفاع یک و مخلوط موجود روی شاخه پایینی دارای ارتفاع m است. به این ترتیب موقعیت هر یک از مخلوط‌ها را می‌توان با دو عدد نشان داد.

۱-۶- روشی برای رسم ساختار تقطیر پایه

در روش ارایه شده در این قسمت ابتدا مشخص می‌شود که هر محصول میانی از یک ریبویلر یا کندانسور و یا هیچیک و از میانه‌های برج بدست می‌آید. فرض بر آن است که ساختارهای پایه ممکن برای یک ترکیب سه جزیی شناخته شده و مطابق شکل ۱-۳ است. برای یک ترکیب چهار جزیی، ابتدا ترکیبات سه‌تایی ممکن بدست می‌آید، سپس هر یک از این ترکیبات سه‌تایی، مطابق شکل ۱-۳، امکان جداسازی از سه طریق را دارا می‌باشند. علاوه بر آن امکان در نظر گرفتن ساختارهای جدید نیز وجود دارد. به همین ترتیب برای خوراکی با پنج جز ابتدا مخلوط‌های چهارجزیی ممکن بدست می‌آید و سپس با توجه به آنکه ساختارهای مربوط به جداسازی چهار جزیی در مرحله قبل بدست آمد، ساختارهای مربوط به پنج جزیی از روی آن بدست می‌آید. در این حالت هم امکان اضافه نمودن ساختارهای جدید ترکیبی وجود دارد. به همین ترتیب یک مخلوط n جزیی به دو مخلوط n-1 جزیی تبدیل شده و ساختارهای معادل n-1 جزیی بدست آمده از مرحله قبل و ساختارهای جدید ممکن، بدست می‌آید.

این روش مرحله به مرحله را می‌توان براساس ۹ مشاهده نمایش داد؛ [۳]

مشاهده۱: سبک‌ترین جزء همواره از یک کندانسور و به صورت محصول بالایی بدست می‌آید. و سنگین‌ترین جزء نیز همواره از یک ریبویلر و از پایین برج بدست می‌آید.

مشاهده۲: یک محصول میانی می‌تواند از یک ریبویلر و یا کندانسور و یا از هیچیک و از میانه یک برج بدست آید. برای یک ترکیب سه‌تایی روش مستقیم نمونه‌ای از حالتی است که محصول میانی از یک کندانسور بدست می‌آید. حالت غیر مستقیم مثالی از حالتی است که محصول میانی از ریبویلر بدست می‌آید و جداسازی مقدماتی نمونه‌ای از حالت سوم است که محصول میانی از میانه برج گرفته می‌شود.

مشاهده۳: مخلوط‌های میانی در صورت وجود در شبکه از یک برج به برج دیگر منتقل می‌شوند (به عنوان محصول نهایی نمی‌باشند.).

مشاهده۴: اگر یک مخلوط میانی از یک برج به برج دیگر منتقل شود، هر دو قسمت تقطیر مرتبط با آن که بعد از مخلوط واقع شده‌اند، در برج دریافت کننده مخلوط موجود خواهند بود. به هر مخلوط میانی که در ارتفاع و عمق میانی واقع شده است، چهار قسمت تقطیر مرتبط می‌باشد، دو تا از آنها بخش‌هایی هستند که زودتر از خود مخلوط در شبکه موجود می‌باشند و مخلوط میانی از آنها بدست می‌آید و دو قسمت دیگر که در عمق جلوتر قرار دارند و معرف جدا شدن مخلوط به دو مخلوط ساده‌تر می‌باشند. به عنوان مثال در شکل ۱-۵-c، دو قسمت ۱۳ و ۱۴، دو بخشی هستند که مخلوط دو جزیی CD از آنها بدست می‌آید و دو قسمت ۱۸ و ۱۹ بخشهایی هستند که معرف جدا شدن مخلوط CD به دو محصول C و D می‌باشند. یعنی هر بخش از گره قبلی ناشی شده و گره بعدی را نتیجه می‌دهد. بنابراین در شکل ۱-۳-a هنگامیکه مخلوط دو جزیی BC به برج تقطیر دوم وارد می‌شود، این برج شامل دو قسمت بالایی و پایینی مرتبط با BC است که به محصولات B و C خاتمه می‌یابند.

مشاهده۵: هنگامیکه یک مخلوط متعلق به شاخه بالایی به برج بعدی منتقل می‌گردد این به معنی اینست که این مخلوط از کندانسور برج قبلی گرفته شده است. به طور مثال در شکل ۱-۳-b مخلوط AB نمونه‌ای از این حالت می‌باشد. چون در غیر اینصورت اگر AB از میانه برج اول گرفته شود و در عین حال A از بالای برج بدست آید، این به معنی آنست که محصول A از دو قسمت قابل حصول است که این حالت جزء حالت پایه نمی‌باشد. همچنین مخلوطی که بر روی شاخه پایینی می‌باشد و از یک برج به برج دیگر منتقل می‌گردد از ریبویلر برج اول گرفته می‌شود. یک مخلوط میانی که بر روی شاخه بالایی یا پایینی شبکه قرار نگرفته را می‌توان از یک ریبویلر یا کندانسور یا هیچیک از آنها و از میانه برج گرفت.

مشاهده۶ : هنگامیکه کندانسوری به یک مخلوط میانی در عمق m یا محصول نهایی نسبت داده می‌شود، تمام مخلوط‌هایی که در عمق جلوتر از m قرار دارند و حاوی مخلوط مورد نظر به عنوان جزء سنگین‌تر هستند، از شبکه حذف می‌گردند. برای مثال، در شبکه شکل ۱-۵-a هنگامیکه یک کندانسور به محصول B در عمق ۳ نسبت داده می‌شود، دیگر مخلوط AB در عمق ۲ بین برجها منتقل نمی‌شود. هنگامیکه یک مخلوط میانی بین برجها منتقل نشود از شبکه حذف می‌گردد در اینصورت ساختار تقطیر به صورت شکل ۱-۳-a خواهد بود. حال

اگر قرار بود که AB نیز در شبکه وجود داشته باشد باید جزء B آن از آن جدا می‌گردید و این کار را نمی‌توان به صورتی انجام داد که B از کندانسور گرفته شود، بنابراین مخلوط AB نمی‌تواند در شبکه وجود داشته باشد.

همچنین در صورتیکه یک ریبویلر به یک مخلوط میانی در عمق m یا محصول نهایی نسبت داده شود، تمام مخلوط‌هایی که در عمق جلوتر از m وجود دارند و حاوی مخلوط مورد نظر به عنوان جزء سبک‌تر هستند، از شبکه حذف می‌شوند.

در صورتیکه محصول میانی از میانه برج و نه از کندانسور و یا ریبویلر یک برج گرفته شود در این صورت هر دو قسمت تقطیر بالایی و پایینی قبلی باید وجود داشته باشند و حذفی صورت نمی‌گیرد. حالت جداسازی مقدماتی در شکل ۱-۳-c یک نمونه از این حالت می‌باشد. مخلوط AB حاوی B به عنوان جزء سنگین‌تر به قسمت بالاتر از محل گرفتن محصول B در برج تقطیر وارد می‌شود و مخلوط BC حاوی B به عنوان جزء سبک‌تر به قسمت پایین‌تر برج و محصول B از محلی بین این دو گرفته می‌شود.

مشاهده۷: این قسمت در واقع نتیجه‌ای از قسمت قبل می‌باشد. اگر یک مخلوط از یک کندانسور گرفته شود، حتما باید یک مخلوط در عمق جلوتر از m وجود داشته باشد که به برج تقطیر وارد شده و مخلوط مورد نظر به عنوان جزء سبک‌تر آن باشد و به طور معکوس برای حالتیکه یک مخلوط از ریبویلر گرفته شود، باید یک مخلوط در عمق جلوتر وجود داشته باشد که مخلوط اصلی مورد نظر به عنوان جزء سنگین‌تر آن باشد.

با توجه به مشاهدات گفته شده در قسمت‌های قبلی ساختار تقطیر را می‌توان با پیروی از مراحل زیر بدست آورد.

مرحله۱: با توجه به مشاهدات ۱ و ۲، قدم اول بدست آوردن تمام حالت‌های ممکن، با نسبت دادن ریبویلر یا کندانسور به هر یک از محصولات میانی است. برای یک ترکیب سه‌تایی سه حالت ممکن است بوجود آید: ۱- نداشتن ریبویلر یا کندانسور برای محصول B، ۲- نسبت دادن یک کندانسور به B و ۳- نسبت دادن یک ریبویلر به B. هنگامیکه n>3، n-2 محصول میانی وجود دارد و۳ حالت برای هر یک ممکن است در نظر گرفته شود پس در نتیجه 3(n-2) حالت ممکن وجود دارد. جدول ۱-۲، ۹ حالت ممکن برای جداسازی یک ترکیب چهار جزیی را نشان می‌دهد. در این جدول نماد S با n-2 اندیس دیده می‌شود که هر اندیس مربوط به یک محصول میانی می‌باشد. اولین اندیس از سمت چپ مربوط به محصول میانی دارای فراریت بیشتر است. (ماده‌ای که از لحاظ فراریت در مکان دوم قرار دارد.). اندیسی که در طرف راست قرار می‌گیرد معرف محصولی است که دارای فراریت کمتری است. هر اندیس می‌تواند سه مقدار 0 و 1 و 2 را بپذیرد. اندیس 0 به معنی این است که ریبویلر یا کندانسوری به محصول میانی نسبت داده نشده است. اندیس 1 بیانگر نسبت دادن یک کندانسور و 2 بیانگر نسبت دادن یک ریبویلر به محصول میانی است. بنابراین در جدول ۱-۲ هر S_{ij} بیانگر یک حالت ممکن است، i معرف محصول B و j معرف محصول C است.