

## طراحی شبکه مبدلهای حرارتی در فرآیند تولید استیک انیدرید به روش pinch

امیر اکبری<sup>۱</sup>، اشکان نقدی<sup>۲</sup>، سامان کرباسچی<sup>۳</sup>، مهدی طهماسبی<sup>۴</sup>

1- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - طراحی فرایندها

2- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - محیط زیست

3- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

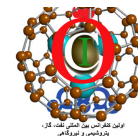
4- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - پدیده های انتقال

### چکیده

حفظ انرژی در طراحی یک واحد شیمیایی همواره یکی از مهمترین موارد مورد توجه است به علاوه تعیین کمترین مقدار انرژی گرمایی و سرمای مورد نیاز یک پروسه از مهمترین محاسبات برای تعیین مقدار ذخیره انرژی است بنابراین انتگراسیون حرارتی (یکپارچه کردن انرژی) یکی از موارد مهم در طراحی های اقتصادی می باشد. اولین گام در انتگراسیون حرارتی بررسی و محاسبات مربوط به کمترین میزان انرژی مورد نیاز از منابع گرم و سرد برای شبکه ی مبدل های حرارتی است هر پروسه ی شیمیایی که در نظر گرفته شود نیازمند چندین جریان گرم و سرد برای تامین انرژی مورد نیاز خود می باشد در این مقاله انتگراسیون حرارتی فرایند تولید استیک انیدرید مورد بررسی قرار می گیرد و بهترین شرایط برای رسیدن به انتگراسیون حرارتی مناسب بررسی می شود .

واژه های کلیدی: شبکه مبدل حرارتی - منابع گرم و سرد انرژی - انتگراسیون انرژی.

1- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه فنی و مهندسی، شاهرود، ایران Akbari.amir.1365@Gmail.com  
2- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه فنی و مهندسی، شاهرود، ایران naghdi.Ashkan@yahoo.com

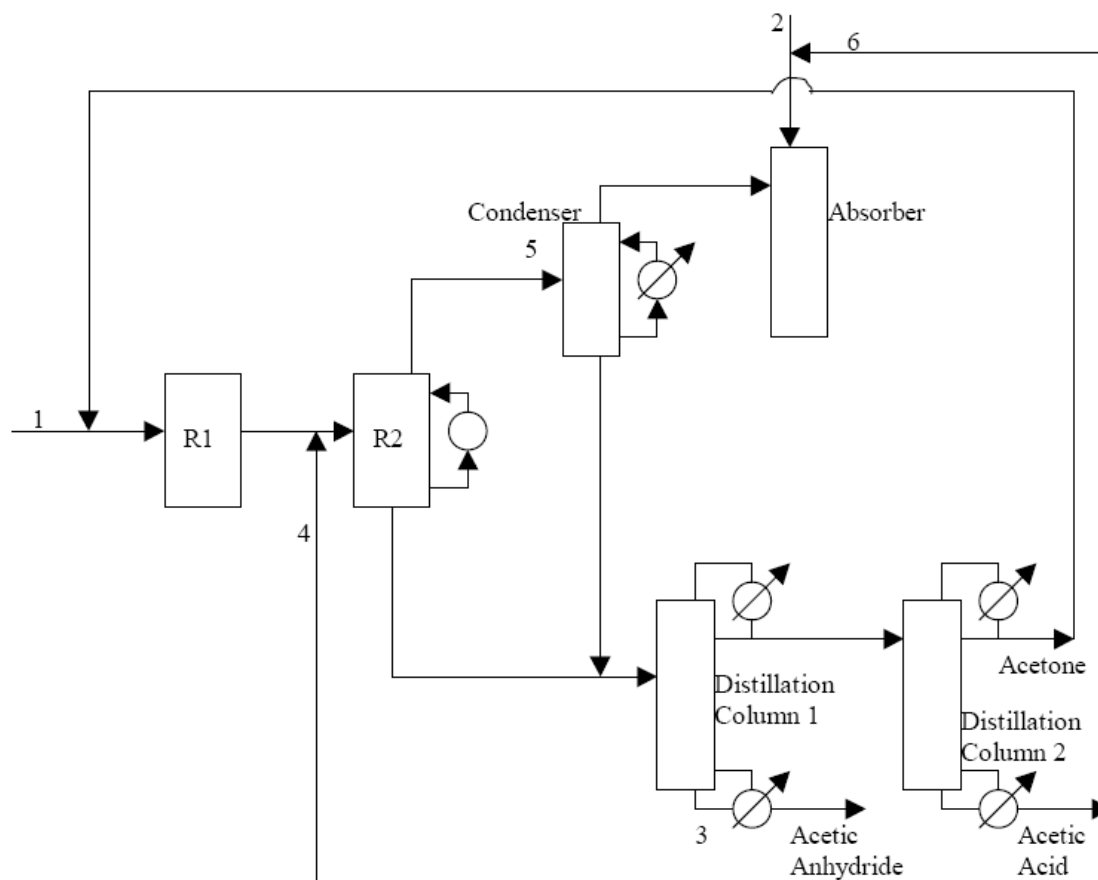


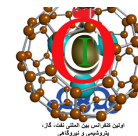
## 1- مقدمه

همانطور که می دانیم امروزه مسئله انرژی یکی از مهمترین مسائل پیش روی بشر می باشد با توجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی این مسئله به یکی از چالشهای پیش روی بشر تبدیل شده یکی از مهمترین و حساس ترین مکان هایی که همواره می تواند به عنوان هدر رفت یا ذخیره انرژی مورد بحث قرار بگیرد پروسه ی تولید انواع مواد شیمیایی است در این مقاله ما به بررسی انتگراسیون حرارتی پروسه ی تولید استیک انیدرید می پردازیم و شرایط مناسب برای حفظ بیشتر انرژی را بررسی خواهیم کرد. همانطور که می دانیم هر پروسه شیمیایی برای رسیدن به محصول مطلوب نیازمند دریافت مقداری انرژی از منابع گرم و سرد می باشد تا این انرژی لازم برای فرایند تامین نشود محصول مورد نظر ما تولید نمی شود هدف از انتگراسیون حرارتی این است که تا جایی که امکان دارد انرژی مورد نیاز فرایند را از خود فرایند تامین کنیم و تا حد امکان از منابع تامین کننده انرژی خارجی (utility) استفاده نکنیم.

## 2- معرفی و بررسی فرآیند از نظر انتگراسیون حرارتی

در شکل زیر طرح شماتیکی از تولید استیک انیدرید آورده شده است در این طرح 6 جریان اصلی نشان داده شده است که 3 جریان از آن نیازمند گرمایش و 3 جریان دیگر نیازمند سرد شدن هستند مثلاً جریان واکنشی در راکتور دوم باید سرد بشود یا زمانی که محصول مایع از راکتور مشابه بیرون می آید باید برای ورود به برج تقطیر گرم بگردد به همین دلیل ما به آب سرد برج خنک کننده برای سرد سازی جریان و بخار برای جریان ورودی به برج تقطیر نیاز داریم [2].





شکل 1- طرح شماتیک تولید استیک انیدرید

در آنالیز انتگرالیون حرارتی دو قانون در نظر گرفته می شود قانون اول بیان کننده تفاوتی است که بین گرمای جریان گرم و گرمای مورد نیاز جریان سرد که باید از شبکه تامین بشود مطرح می گردد. میزان گرمای تبادل شده ی بین هر جریان با استفاده از رابطه ی فوق قابل محاسبه می باشد :

$$Q_i = F_i C_{p_i} T_i \quad (1)$$

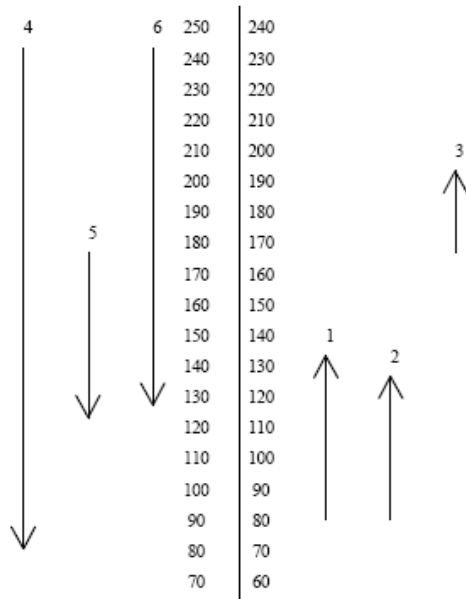
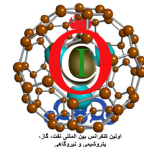
جدول 1- بیان کننده حالت توصیفی هر جریان می باشد

شماره جریان	توصیف وضعیت حرارتی
1	استون ای که تازه وارد فرآیند شده
2	استیک اسید ای که تازه وارد فرآیند شده
3	ریبویلر برج تقطیر اول
4	استیک اسید برگشتی که وارد راکتور دوم می شود
5	جریان ورودی به کندانسور
6	استیک اسید برگشتی که وارد برج جذب می شود

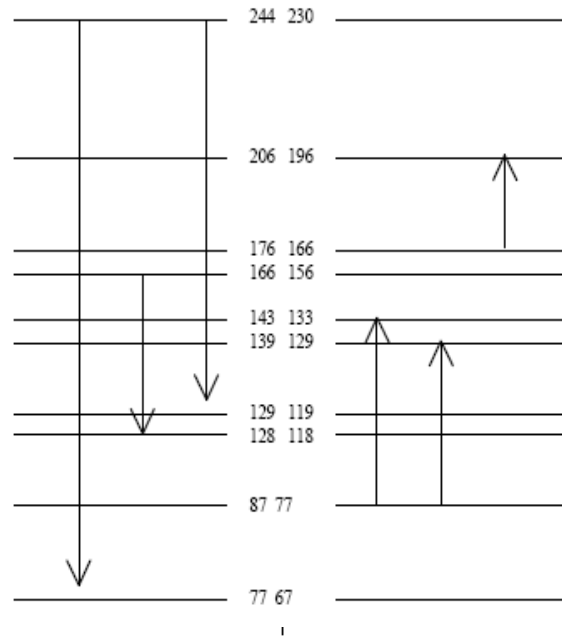
جدول 2 - نشان دهنده ی محاسبات مربوط به هر جریان می باشد

شماره جریان	وضعیت حرارتی	FC <sub>p</sub> (BTU/hr °F)	T <sub>in</sub> (°F)	T <sub>out</sub> (°F)	Q 10 <sup>5</sup> BTU/hr
1	سرد	4893	77	133	-2.74
2	سرد	2173	77	129	-1.13
3	سرد	5*10 <sup>5</sup>	156	196	-205
4	گرم	1.23*10 <sup>4</sup>	244	77	21
5	گرم	2.75*10 <sup>5</sup>	176	128	132
6	گرم	1046	244	129	1.2
				مجموع	-50.25

همانطور که از جدول شماره 2 پیداست مقدار  $50.25 \times 10^5$  BTU/hr باید از جریانات utility انرژی دریافت بگردد . محاسبات قانون اول بطور دقیق بیان نمی کند که گرما می تواند از جریان گرم به جریان سرد به شرطی که دمای جریان گرم بیشتر از سرد باشد انتقال پیدا کند به همین دلیل قانون دوم مطرح می شود که بیان کننده حالتی است که یک اختلاف دمایی مثبت بین جریان گرم و سرد مطرح بگردد . برای هر شبکه ی مبدل حرارتی قانون دوم هم باید علاوه بر قانون اول عملی باشد. حالا اگر اختلاف دمایی بین جریان گرم و سرد را 10 درجه در نظر بگیریم نمودارهای زیر بدست خواهد آمد [2 و 1].



نمودار 2- مقیاس تغییرات دمایی



نمودار 1- اختلاف دمائی

در هر اختلاف دمایی گرما از هر جریان گرمی با اختلاف دمایی بالا می تواند به هر جریان سردی با اختلاف دمایی کمتر انتقال پیدا کند پس ضروری است که از معادله زیر برای محاسباتمان استفاده کنیم:

$$Q_i = [\sum (FCp)_{hot,i} - \sum (FCp)_{cold,i}] \Delta T_i \quad (2)$$

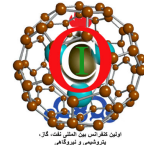
مثلا برای جریان یک داریم :

$$Q_1 = [1046 + 1.12X^4](244 - 206) = 5.07 * 10^5 \quad (3)$$

سایر محاسبات در نمودار شماره 3 نشان داده شده است [4].

نمودار 3- انرژی خالص مورد نیاز برای هر اختلاف دمایی

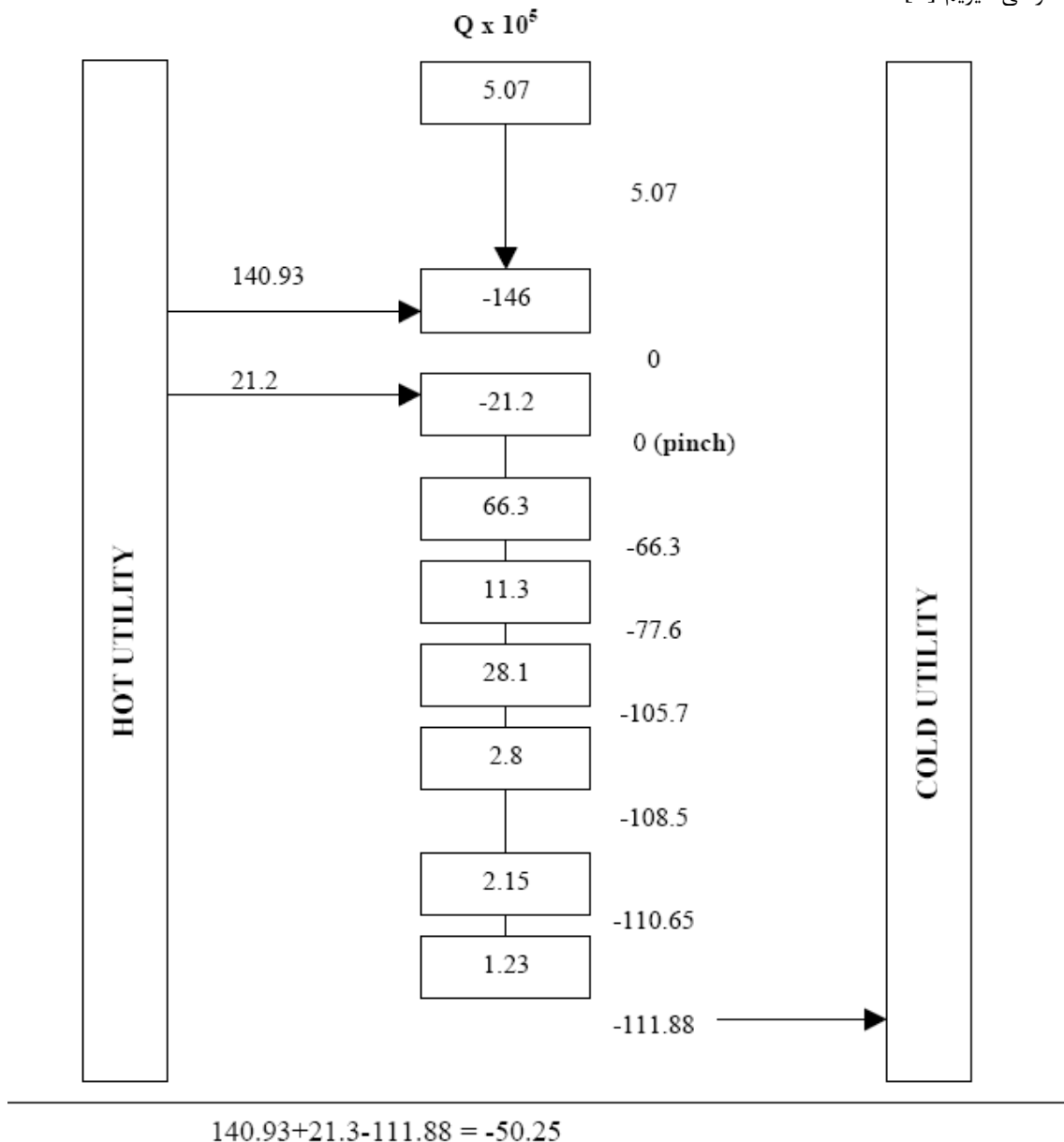
4	5	6	1	2	3	Q x 10 <sup>5</sup>
244	230					5.07
206	196			↑		-146
176	166					-21.2
143	133			↑	↑	66.3
139	129					11.3
129	119			↑	↑	28.1
128	118					2.80
87	77					2.15
77	67					1.23
<b>Total =</b>						<b>-50.25</b>



### 3- نمودار آبشاری (cascade diagram)

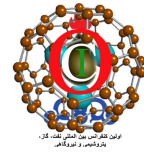
در شکل زیر نمودار آبشاری مورد نظر فرآیند نشان داده شده است این نمودار نشان دهنده ی کمترین مقدار انرژی مورد نیاز از جریان گرم و سرد می باشد که بر همین اساس کمترین مقدار انرژی مورد نیاز از جریان گرم  $(1.6213 \times 10^7 \text{ BTU/hr})$  و کمترین مقدار انرژی مورد نیاز از جریان سرد  $(5.025 \times 10^7 \text{ BTU/hr})$  می باشد که از قانون اول تبعیت می کند که حالا باید این با قانون دوم هم ثابت بشود.

از شکل 4 مشاهده می شود که هیچگونه اختلاف دمایی بین سومین و چهارمین اختلاف دمایی وجود ندارد پس این نقطه از شکل  $\text{pinch point}$  می باشد دمای  $166^\circ\text{F}$  از جریان گرم و دمای  $156^\circ\text{F}$  از جریان سرد که اغلب دمای میانگین  $161^\circ\text{F}$  را در نظر می گیریم [1].

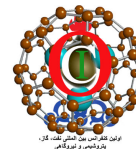


# اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



شکل 2- نمودار آبشاری (cascade diagram)



گرمای مورد نظر باید در دمایی بین بالاتر و پایین تر از pinch point فراهم بگردد و گرمای اضافی باید به منبع سرد انتقال داده بشود.

- قوانینی که باید در نظر گرفته شود به شرح زیر است :
- در طول pinch point انتقال حرارتی انجام نمی شود.
- گرمای اضافی فقط در Above of the pinch داریم.
- سرما فقط در Below of the pinch داریم [1].

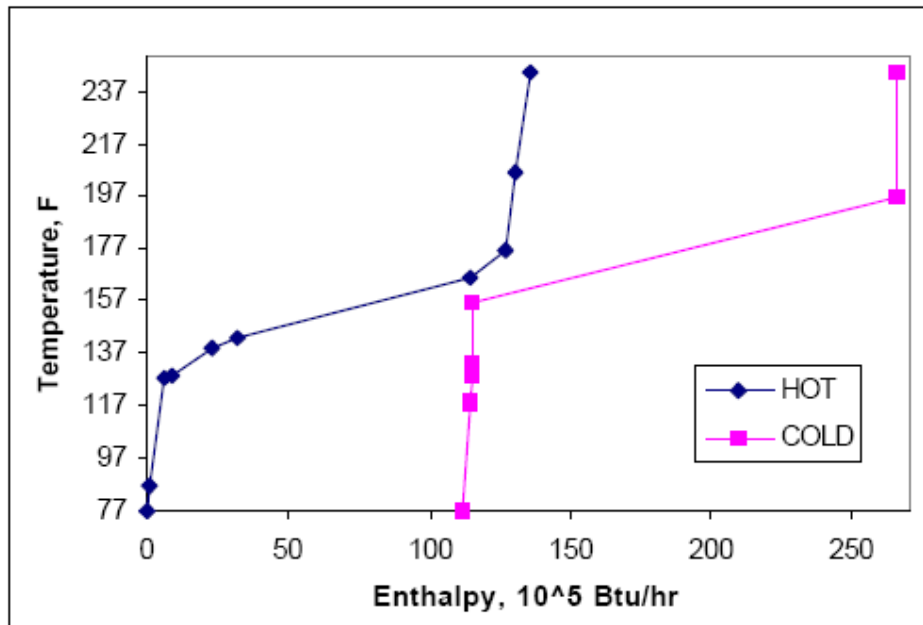
## 4- نمودار دما - آنتالپی (Composite curve)

برای رسم این نوع نمودار ابتدا باید کمترین و بیشترین بار گرمایی محاسبه بشود بنابراین بر این اساس باید در ابتدا سردترین دما از جریان گرم را تعریف کنیم که در دمای 77 °F در شکل 2 و H=0 این نقطه معین گردیده است در دومین گام در محاسبات مجموع گرما در تمام جریانات گرم محاسبه می گردد از اختلافات دمایی کم به زیاد در نظر گرفته می شود. محاسبات برای جریانات گرم به قرار زیر خواهد بود [1] :

Hot stream		Cumulative H (BTU/hr)
77 °F	H <sub>0</sub> =0	0
87 °F	H <sub>1</sub> =(10 <sup>4</sup> *1.23)(87-77)=1.23*10 <sup>5</sup>	1.23*10 <sup>5</sup>
128 °F	H <sub>2</sub> =(10 <sup>4</sup> *1.23)(87-128) = 5.04*10 <sup>5</sup>	6.۲7*10 <sup>5</sup>
129 °F	H <sub>3</sub> = 2.87*10 <sup>5</sup>	9.14*10 <sup>5</sup>
139 °F	H <sub>4</sub> =2.28*10 <sup>6</sup>	2.۲8*10 <sup>6</sup>
143 °F	H <sub>5</sub> =1.15*10 <sup>6</sup>	3.194*10 <sup>6</sup>
166 °F	H <sub>6</sub> =6.63*10 <sup>6</sup>	1.15*10 <sup>7</sup>
176 °F	H <sub>7</sub> =2.88*10 <sup>6</sup>	1.27*10 <sup>7</sup>
206 °F	H <sub>8</sub> =4.00*10 <sup>5</sup>	1.31*10 <sup>7</sup>
244 °F	H <sub>9</sub> =5.07*10 <sup>5</sup>	1.36*10 <sup>7</sup>

حالا نمودار آنتالپی بر حسب دما مانند شکل-3 بدست می آید به این نمودار Composite curve برای جریان گرم گفته می شود چون بیان کننده تمام اثرات جریان گرم می باشد. بطور مشابه می توان Composite curve را برای جریانات سرد با محاسبه ی آنتالپی و آنتالپی تجمعی جریانات سرد ترسیم کرد محاسبات برای جریانات سرد به قرار زیر خواهد بود [1] :

Cold stream		Cumulative H (BTU/hr)
77 °F	H <sub>1</sub> =1.1188*10 <sup>7</sup>	1.1188*10 <sup>7</sup>
118 °F	H <sub>2</sub> =(2173+4893)(118-77)=2.90*10 <sup>5</sup>	1.1478*10 <sup>7</sup>
119 °F	H <sub>3</sub> =(2173+4893)(119-118)=	1.1485*10 <sup>7</sup>
129 °F	7.۰66*10 <sup>3</sup>	1.1555*10 <sup>7</sup>
133 °F	H <sub>4</sub> = 7.066*10 <sup>4</sup>	1.1575*10 <sup>7</sup>
156 °F	H <sub>5</sub> =1.96*10 <sup>4</sup>	1.1575*10 <sup>7</sup>
166 °F	H <sub>6</sub> = 0	1.6575*10 <sup>7</sup>
196 °F	H <sub>7</sub> = 5.0*10 <sup>6</sup>	3.1575*10 <sup>7</sup>
244 °F	H <sub>8</sub> =1.5*10 <sup>7</sup>	3.1575*10 <sup>7</sup>



شکل 3- نمودار اختلاف دما بر حسب آنتالپی با اختلاف دمای 10 °F

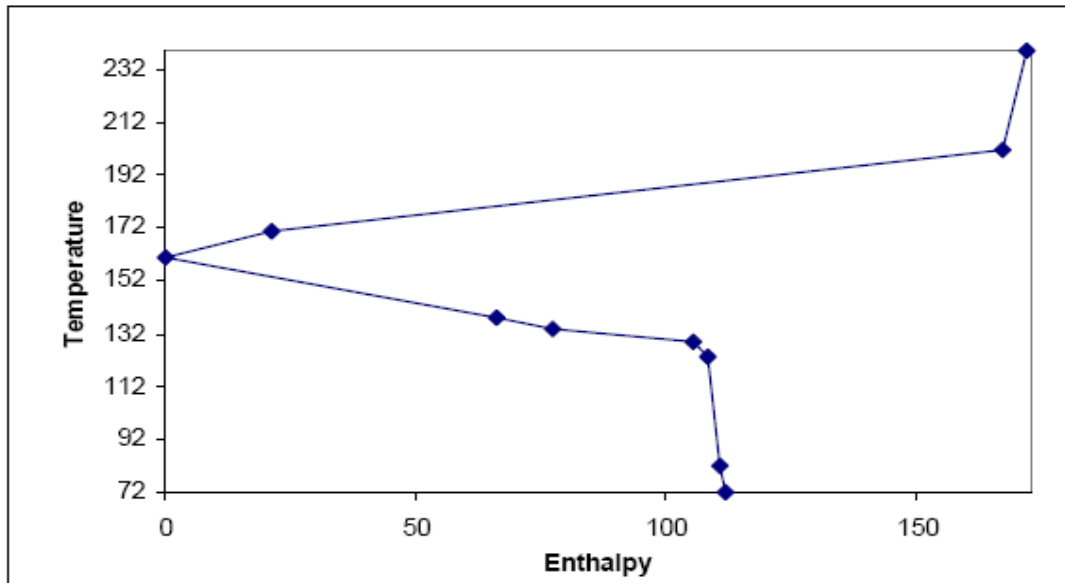
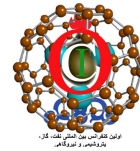
نکته ای که از نمودار قابل رویت می باشد این است که در دمای بین 166 °F و 156 °F کمترین اختلاف مشاهده می گردد. به عبارت دیگر منحنی های گرمایی و سرمایی به هم نزدیکتر می شوند [1].

### 5- دیاگرام grand composite curve

دیاگرام دیگری که مفید می باشد دیاگرام grand composite curve نامیده می شود این منحنی از نقطه pinch آغاز می شود که همان دمای 161 °F می باشد. پس برای اختلاف دمای بزرگ بعدی دوباره میانگین دمایی در نظر می گیریم و دوباره گرمای کل جریان محاسبه می شود محاسبات در زیر در نشان داده شده است [1]:

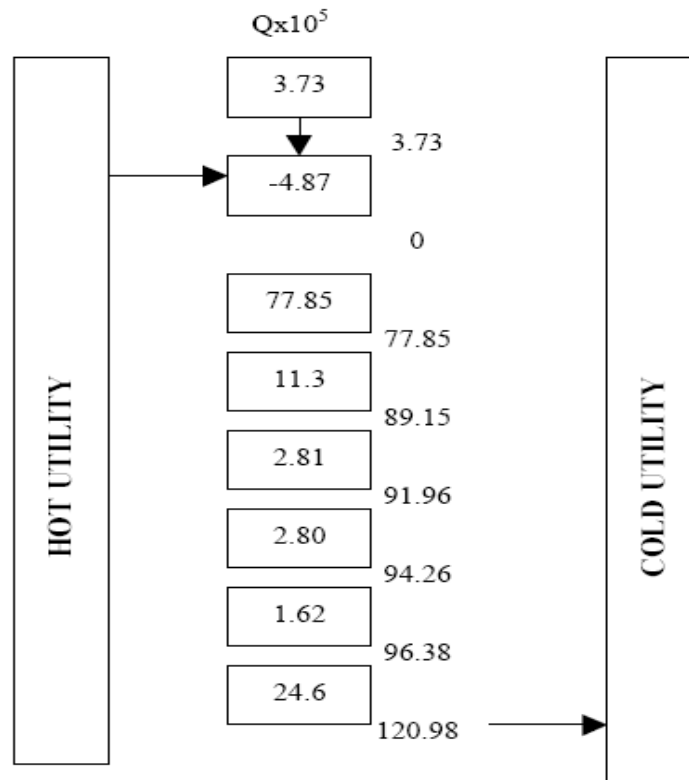
T(°F)	10 <sup>5</sup> H(BTU/hr)
72 °F	H <sub>1</sub> =1.23+2.15+2.8+28.1+11.3+66.3
82 °F	H <sub>2</sub> = 2.15+2.8+28.1+11.3+66.3
123 °F	H <sub>3</sub> =2.8+28.1+11.3+66.3
128.5 °F	H <sub>4</sub> = 28.1+11.3+66.3
134 °F	H <sub>5</sub> =11.3+66.3
138 °F	H <sub>6</sub> = 66.3
161 °F	H <sub>7</sub> = 0
171 °F	H <sub>8</sub> = -21.2
201 °F	H <sub>9</sub> = 146+21.2
239 °F	H <sub>10</sub> = 21.2+146+5.07

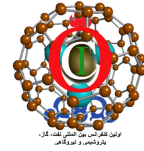




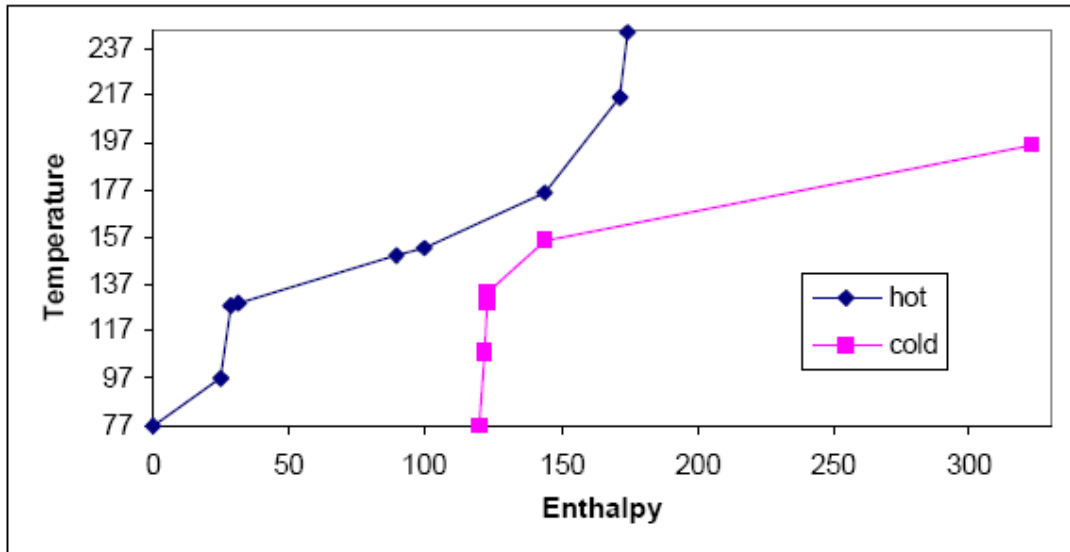
شکل 4- نمودار grand composite curve

بر همین اساس زمانی که کمترین اختلاف دمایی تغییر می کند سیستم ما دچار تغییر می شود بر همین اساس شکل 5 نشان دهنده ی نمودار آبشاری و شکل 6 نشان دهنده ی منحنی T-H بر اساس اختلاف دمایی  $20^{\circ}\text{F}$  و شکل 7 نشان دهنده ی grand composite curve می باشد [1].

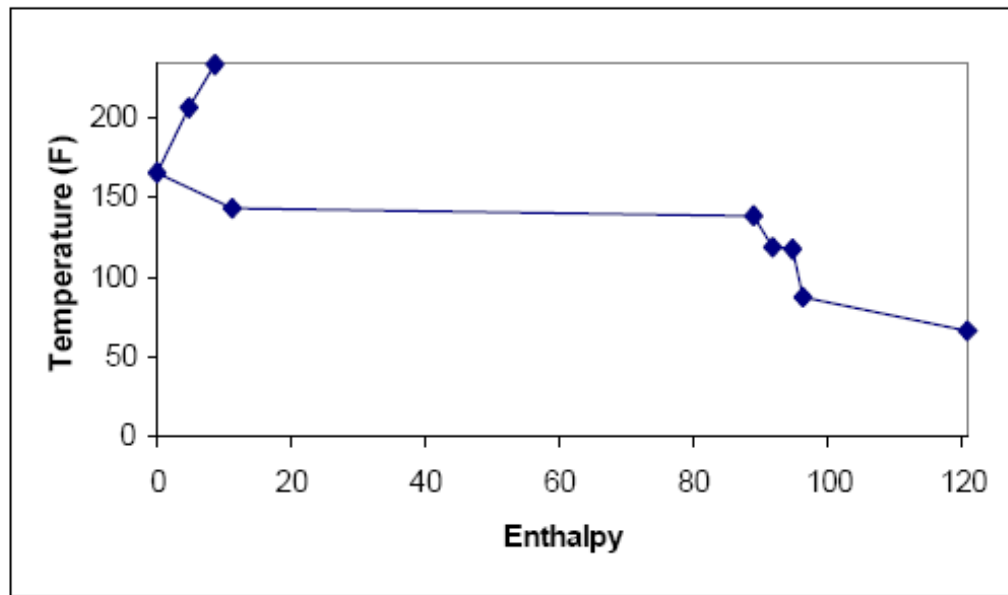




شکل 5- نمودار آبخاری با اختلاف دمایی 20 °F

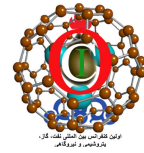


شکل 6- نمودار اختلاف دما بر حسب آنتالپی با اختلاف دمایی 20 °F



شکل 7- نمودار grand composite curve برای اختلاف دمایی 20 °F

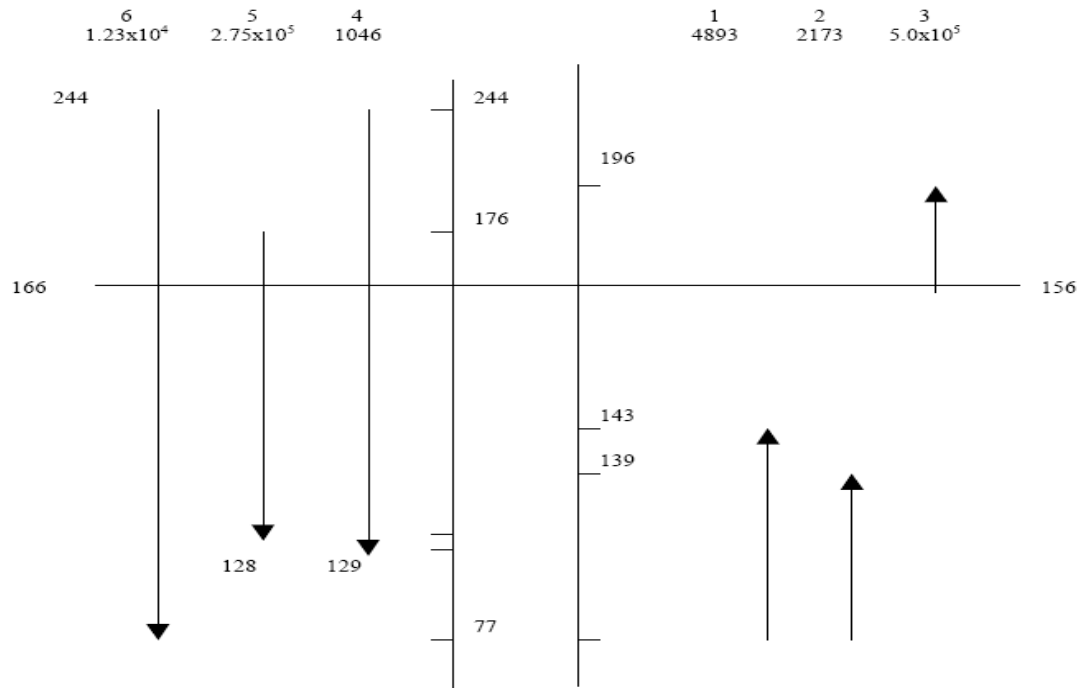
6- کمترین میزان انرژی شبکه ی مبدل های حرارتی



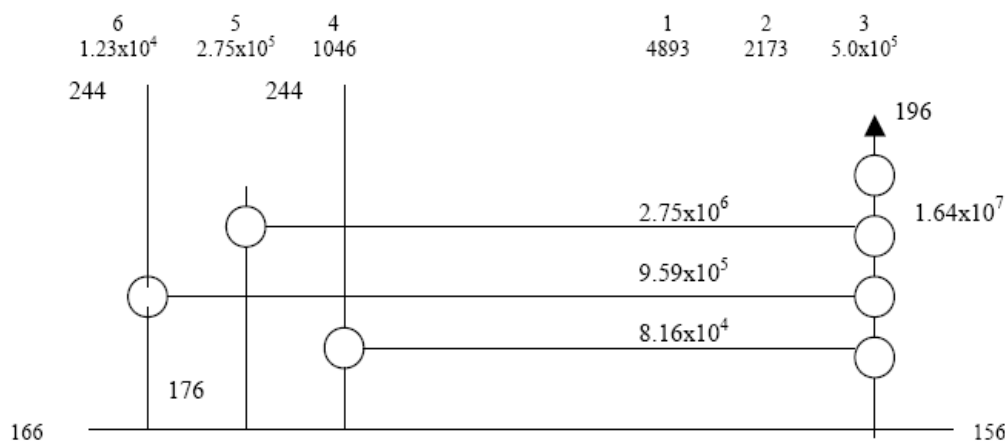
حالا که ما تعداد میدل های حرارتی و کمترین انرژی گرمایی و سرمایی مورد نیاز را می دانیم می توانیم به طراحی شبکه میدل حرارتی بپردازیم بر همین اساس باید دو جریان تابع را در نظر بگیریم یکی جریانات بالا دستی pinch و دیگری جریانات پایان دستی pinch است [3].

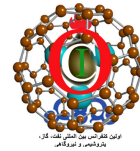
## 1-6- طراحی دمای بالا دست جریان (above of the pinch)

ما می توانیم دمای ورودی و خروجی به هر جریان را محاسبه کنیم این دما می تواند از شکل 8 بدست آید بر همین اساس مثلا دمای ورودی و خروجی به جریان شماره 3 معادل 156 و 196 می باشد. همچنین ما می توانیم محاسبه کنیم بار گرمایی مورد نیاز هر جریان را با استفاده از مقدار FCP محاسبه کنیم. همچنین می توانیم یک حالت تعادلی در بین هر جریان ایجاد کنیم به معنای دیگر می توانیم بین هر جریان گرم و سرد یک ارتباط داشته باشیم بار گرمایی باقی مانده از جریان گرم می تواند تامین کننده میزان گرمای مورد نیاز هر جریان سرد باشد این میزان حجم بار حرارتی در شکل 8 نشان داده شده است [3].



شکل 8- بار گرمایی مورد نیاز برای هر جریان



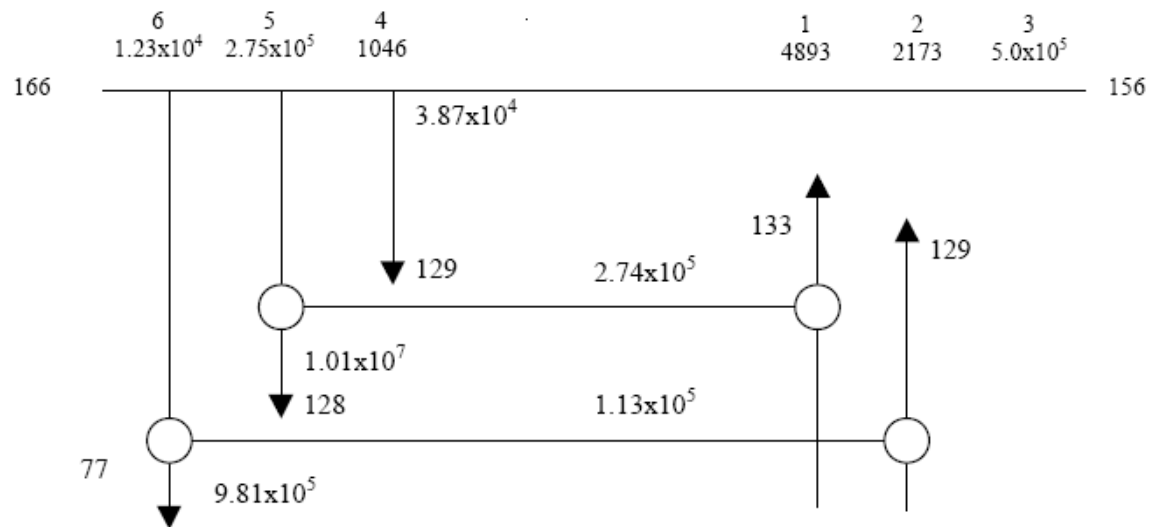


شکل 9 - نشان دهنده ی جریان بالای خط pinch است

زمانی که ما توانستیم بین جریان ها تطابق دمایی برقرار کنیم حالا می توانیم فقط گرما را به بالای نقطه pinch بدهیم و گرما را از پایین نقطه pinch بگیریم. حالا ما قدریم که تمام گرما را از 3 جریان گرم به جریان سرد انتقال بدهیم که این بحث در شکل 9 نشان داده شده است پس ما به 4 مبدل در جریان بالایی pinch نیاز داریم [3].

## 2-6- طراحی دمای پایین دست جریان (below of the pinch)

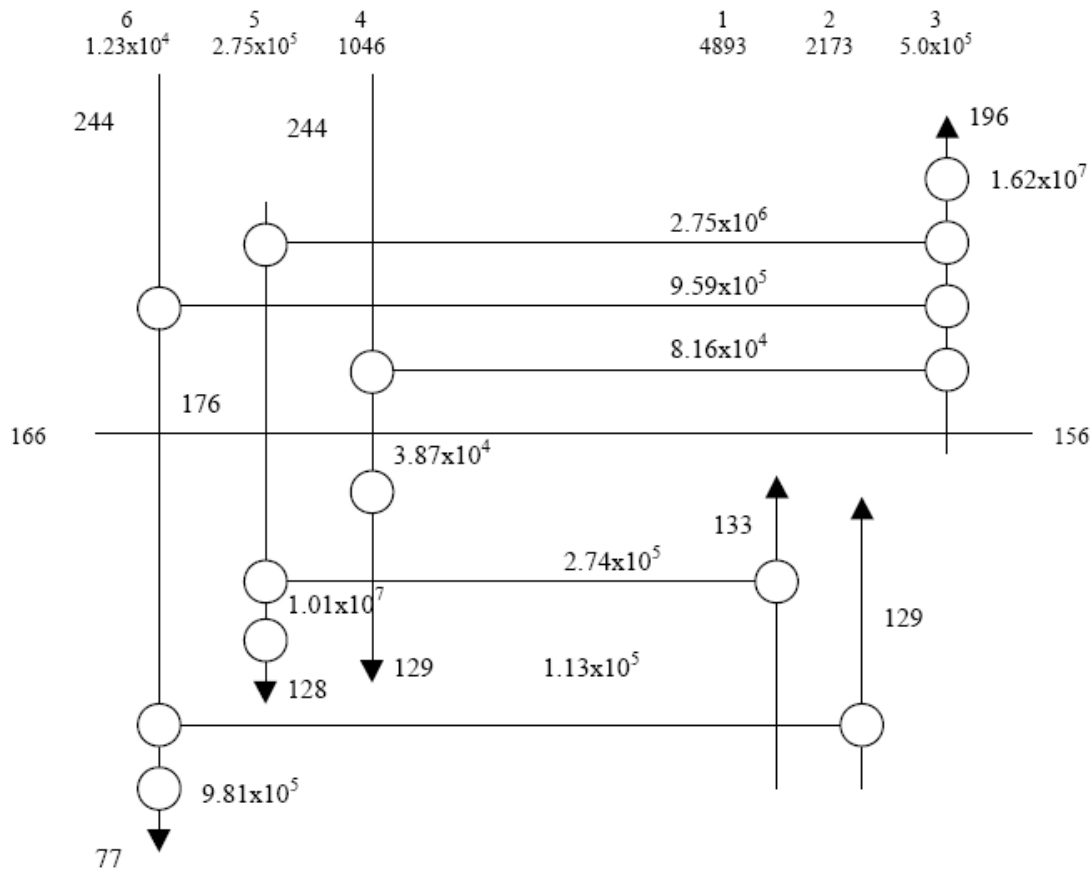
روش تخمین کمترین تعداد مبدل حرارتی در پایین دست نقطه pinch نظیر تخمین در بالادست جریان است تنها تفاوت این دو این است که به جای منابع گرم از منابع سرد استفاده می کنیم. بنابر این در اینجا کولر جایگزین هیتر می شود جریان ها و بارهای گرمایی در شکل 10 نشان داده شده اند. از این شکل ما می توانیم ببینیم که تعداد کولرها در پایین دست نقطه pinch 5 تاست که 3 تای آنها منابع utility هستند.



شکل 10- جریانات پایین دست نقطه pinch



تعداد کل مبدل های حرارتی در مجموع در بالا و پایین نقطه pinch در مجموع 9 مبدل می باشد که این مبدل ها در شکل 11 نشان داده شده است مقدار کل بار حرارتی  $16459012 \text{ BTU/hr}$  است و مقدار کل سرمای مورد نیاز  $11196398 \text{ BTU/hr}$  می باشد [3].



شکل 11- طراحی بر اساس کمترین میزان انرژی

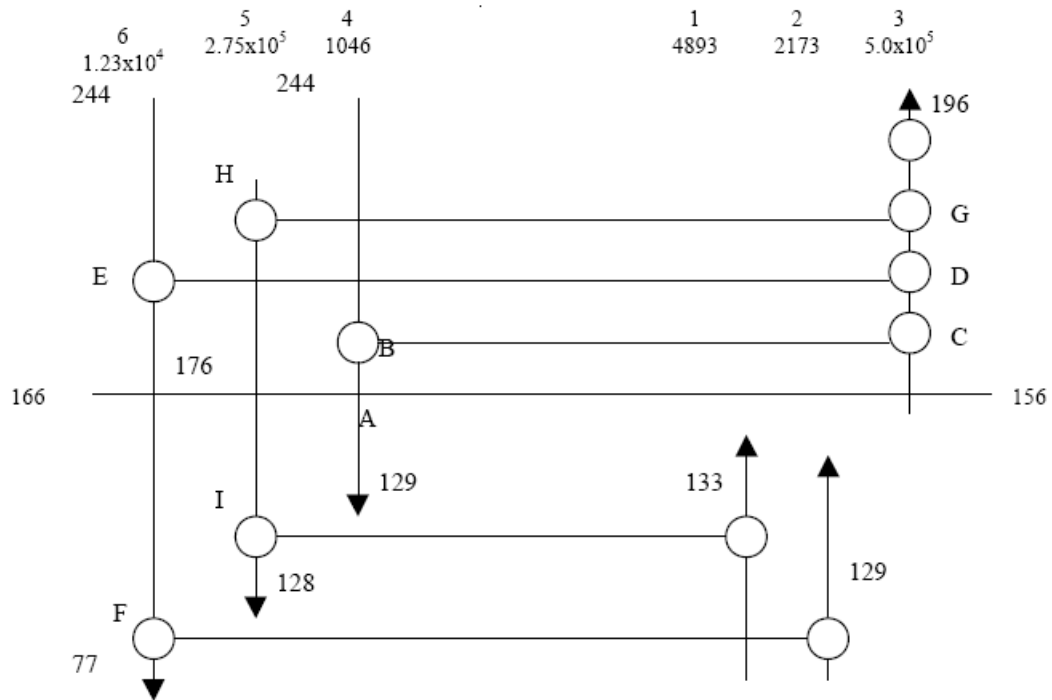
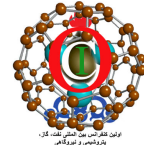
## 7- تعیین path و loop

در تعیین loop از یک مبدل حرارتی شروع می کنیم از روی مبدل ها عبور کرده دوباره به مبدل مورد نظر بر می گردیم شکل 12 یک loop پیشنهادی در این زمینه را نشان می دهد ABCDEF و ABCDGH می تواند به عنوان loop در نظر گرفته شود.

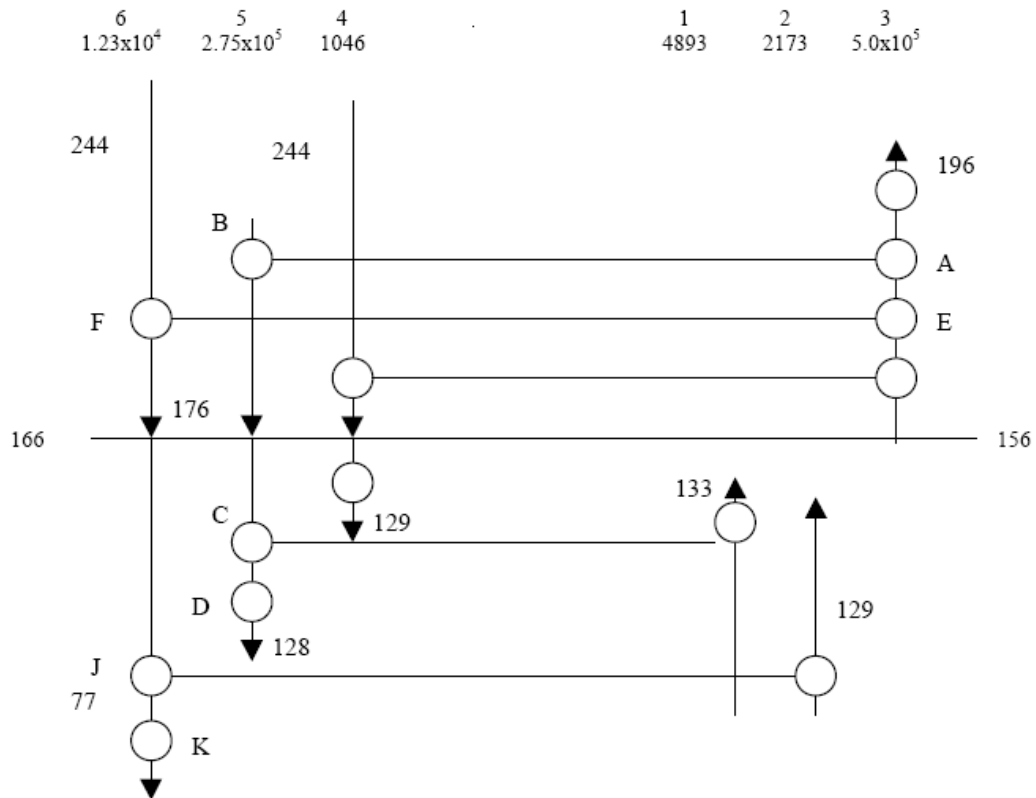
اما path مسیری است که از منابع گرم و سرد utility عبور می کند برای مثال ABCD و EFJK path هستند که در شکل 13 نشان داده شده اند [1و3].

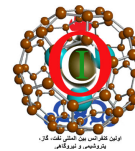
# اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



شکل 12 - loop پیشنهادی





شکل 13 - نمودار path

## 8- کاهش تعداد مبدلهای حرارتی :

تعداد مبدلهای حرارتی = تعداد جریانها + تعداد منابع utility - 1

از این روش تعداد مبدلهای مورد نیاز در این واحد عملیاتی 7 تا محاسبه می شود این درحالی است که تعداد مبدلهای مورد نیاز در روش قبلی 9 تا بود . کاهش تعداد مبدلهای حرارتی قطعاً هزینه های کلی ما را (هزینه سرمایه گذاری) کاهش می دهد اگرچه هزینه های utility (هزینه های عملیاتی) ما را افزایش می دهد بنابراین موضوع اصلی در این مرحله تعیین کمترین میزان هزینه های سالیانه شبکه مبدلهای حرارتی است. به طور کلی همیشه تعداد مبدلهای مورد نیاز برای کل پروسه کمتر یا مساوی است با کمترین میزان انرژی مورد نیاز شبکه مبدلهای حرارتی.

کاهش تعداد مبدلهای حرارتی مستلزم ایجاد یک شکست کوچک در loop مورد نظر ماست اما در این پروسه مطالعاتی هیچ loop قابل شکستن نیست بنابراین تعداد مبدلهای حرارتی برابر می شود با مقداری که در محاسبه ی کمترین مبدل های حرارتی شبکه بررسی شد [1و3].

## نتیجه گیری

- 1- بطور کلی همیشه تعداد مبدلهای مورد نیاز برای کل پروسه کمتر یا مساوی است با کمترین میزان انرژی مورد نیاز شبکه مبدلهای حرارتی.
- 2- اگر ما از طراحی کمترین میزان انرژی استفاده می کنیم حتما باید از loop ای استفاده کنیم که شامل نقطه pinch باشد.
- 3- ما می توانیم  $\Delta T_{min}$  را به وسیله انتقال گرما به مسیر path پس بدهیم که این افزایش انرژی در خود پروسه صرف می شود.

## منابع

- [1] Douglas, J.M. " *Conceptual Design of Chemical Engineering*", McGraw-Hill, New York,(1988).
- [2] King, C.J. " *Separation Processes*". McGraw-Hill, New York, (1971).
- [3] Linnhoff, B. "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", *Chemical Engineering Science*, vol 38, No. 5, pp, 745. Great Britain.
- [4] Wankat, P.C. "Equilibrium staged Separations". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (1988).