کویل‌های حرارتی و برودتی

کویل‌ها به دو نوع کویل‌های گرمایشی و کویل‌های سرمایشی تقسیم می‌شوند. کویل‌های گرمایشی به دو نوع کویل‌های بخار و آبگرم تقسیمم می‌شوند. کویل‌های سرمایشی نیز به دو نوع کویل‌های انبساط مستقیم (DX) و کویل‌های آب سرد تقسیم می‌شوند. از آنجا که در محاسبه کویل‌های انبساط مستقیم پارامترهای زیادی دخالت دارند، نمی‌توان به یک رابطه مطمئن سرانگشتی جهت تخمین و محاسبه آن‌ها اطمینان کرد و بنابراین در ادامه به جداول و روابط تجربی و سرانگشتی جهت انتخاب کویل‌های آب گرم، بخار و آب سرد اکتفا می‌شود.

۱- در عبور هوا از کویل درصدی از حجم هوا بدون آنکه دمایش تغییر کند از بین لوله‌ها و پره‌های کویل فرار می‌کند. بنابراین معمولا دمای خشک هوای عبور کرده از کویل با دمای سطح کویل متفاوت خواهد بود. میزان نزدیک شدن دمای خشک هوا به دمای متوسط سطح کویل با ضریب عبور هوا (bypass factor) بیان می‌شود. مفهوم ضریب عبور هوا (کنار گذر) را می‌توان از فرمول زیر دریافت:

$$BPF = \frac{t_{la}-t_{coil}}{t_{ea}-t_{coil}}$$

که در آن داریم:

t_{coil}: دمای سطح کویل

t_{la}: دمای خشک هوای خروجی از کویل

t_{ea}: دمای خشک هوای ورودی به کویل

برای یک کویل یک ردیفه با ۸ پره در هر اینچ ضریب کنار گذر در حدود ۵۷ درصد است. یعنی ۵۷ درصد هوا بدون تاثیر از اطراف کویل عبور می‌کند. طبق پژوهش‌های آزمایشگاهی، برای یک کویل با n ردیف ضریب BPF برابر است با ضریب BPF یک کویل یک ردیفه به توان n بنابراین:

کویل دو ردیفه $BPF = 0.56^2 = 0.133$

کویل چهار ردیفه $BPF = 0.56^4 = 0.10$

کویل شش ردیفه $BPF = 0.56^6 = 0.0314$

کویل شش ردیفه $BPF = 0.56^8 = 0.0099$

برای تمامی موارد فوق تعداد فین در هر اینچ معادل FPI=8 است. ضریب عبور هوا برای سایر شرایط را می‌توان از جدول زیر به دست آورد.

Depth of Coils (Rows)	without Sprays		with Sprays	
	8Fins/inch	14Fins/inch	8Fins/inch	8Fins/inch
	Velocity (fpm)			
	300-700	300-700	300-700	300-700
2	0.42-0.55	0.22-0.38	-	-
3	0.24-0.4	0.1-0.23	-	-

Depth of Coils (Rows)	without Sprays		with Sprays	
	8Fins/inch	14Fins/inch	8Fins/inch	8Fins/inch
	Velocity (fpm)			
	300-700	300-700	300-700	300-700
4	0.19-0.3	0.05-0.14	0.12-0.22	0.03-0.1
5	0.12-0.23	0.02-0.09	0.08-0.14	0.01-0.08
6	0.08-0.18	0.01-0.06	0.06-0.11	0.01-0.05
8	0.03-0.08	-	0.02-0.05	-

جدول زیر نیز ضرایب عبور هوا را برای کاربری‌های مختلف ارائه می‌دهد:

ضریب عبور	نوع کاربرد	مثال
0.3-0.5	بارهای کلی کوچک- بارهای کلی بزرگ‌تر با بار نهان زیاد	مسکونی
0.2-0.3	شرایط آسایش با بار کلی کوچک یا ضریب حرارت محسوس کوچک	مسکونی-فروشگاه کوچک
0.1-0.2	کاربرد آسایش	بانک-کارخانه- فروشگاه
0.05-0.1	بار محسوس زیاد داخلی یا بار تهویه زیاد	رستوران
0-0.1	شرایطی که به صد درصد هوای خارج نیاز است	بیمارستان

۲- سرعت هوا روی کویل‌های سرمایشی معمولا بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ فوت بر دقیقه و به طور متوسط 500fpm در نظر گرفته می‌شود. گستره این سرعت برای کویل‌های گرمایشی 500-900fpm است.

۳- سرعت هوا روی کویل‌های پیش گرمایش معمولا 600fpm در نظر گرفته می‌شود. در شکل زیر دیاگرام‌های لوله‌کشی این نوع کویل‌ها نشان داده شده است:

۴- معمولا در ساخت کویل‌ها از لوله‌های مسی و پره‌های آلومینیومی استفاده می‌شود مگر در شرایط خاص که ممکن است لوله‌ها مانیسمان بوده و یا جهت جلوگیری از خوردگی پره‌ها نیز مسی انتخاب شوند. بدیهی است انتقال حرارت برای کویل‌هایی که جنس لوله‌ها و پره‌های آن یکی است بیشتر است. فاصله عمودی بین لوله‌های کویل به استانداردهای سازنده آن بستگی دارد ولی معمولا به صورت زیر است:

الف- برای لوله‌های به قطر $\frac{5}{8}$ اینچ این فاصله ۳۸ میلی‌متر معادل ۱/۵ اینچ است.

ب- برای لوله‌های به قطر $\frac{3}{8}$ اینچ این فاصله ۲۵ میلی‌متر معادل یک اینچ است.

ج- برای لوله‌های به قطر $\frac{1}{2}$ اینچ این فاصله ۳۱/۷۵ میلی‌متر معادل ۱/۲۵ اینچ است.

۵- برای انتخاب سریع و سرانگشتی کویل‌های آب گرم می‌توان از جدول زیر استفاده نمود. منظور از Row در جدول مقدار ردیف‌های کویل و FPI تعداد پره‌ها در هر اینچ است. Water Temp نیز درجه حرارت آب ورودی به کویل برحسب درجه فارنهایت است. سایر اعداد مندرج در جدول تعداد حرارتی است که می‌توان از هر فوت

مربع سطح مفید کویل برحسب $\frac{Btu}{h}$ به دست آورد. این جدول بر اساس دمای هوای خروجی از کویل معادل 110°F و اختلاف درجه حرارت آب ورودی و خروجی کویل معادل $\Delta t = 20^\circ F$ طراحی شده است. در ادامه با ارائه مثالی نحوه استفاده از جدول مشخص می‌شود:

Row		1				2			
FPI		8	10	12	14	8	10	12	14
Water Temp(°f)	160	12800	15000	16900	187000	21000	25000	27000	29000
	170	14000	16000	185000	20500	24000	27500	30500	33000
	180	15500	18000	20500	23000	27000	30000	34000	36500

Row		3				4			
FPI		8	10	12	14	8	10	12	14
Water Temp(°f)	160	28000	32000	34000	37000	33000	36000	39000	41000
	170	32000	35500	38500	41000	37500	41000	43000	46000
	180	35000	39500	43000	45500	41000	45000	48000	50000

مثال ۱: مطلوب است تعیین مشخصات کویل آب گرمی که باید پاسخگوی ظرفیت حرارتی معادل 220000 But/hr باشد. درجه حرارت آب ورودی به کویل 170˚F بوده و کل هوا برگشتی است (هوای تازه نداریم) سایر شرایط را برای سطح دریا در نظر بگیرید.

حل: با فرض اینکه دمای خشک طرح داخل 70˚F باشد می‌توان نوشت:

$$Q = 1.08 \times cfm \times \Delta t \Rightarrow 220000 = 1.08 \times cfm \times (110 - 70) \Rightarrow cfm \approx 5100$$

در نتیجه با در نظر گرفتن سرعت 500 fpm روی کویل سطح کویل برابر می‌شود با:

$$Q = A.V \Rightarrow A = \frac{cfm}{fpm} = \frac{5100}{500} \Rightarrow A = 10.2\,ft^2$$

بنابراین حرارت به دست آمده از هر فوت مربع کویل برابر است با:

$$\frac{Btu}{hr.ft^2} = \frac{220000}{10.2} = 21568$$

با مراجعه به جدول برای آب ورودی با درجه حرارت 170˚F می‌توان یک کویل دو ردیفه با هشت پره در هر اینچ انتخاب نمود.

مثال ۲: برای یک سالن ورزشی به مساحت $1000\ m^2$ و ارتفاع 7m یک دستگاه ایرواشر طراحی شده است. طبق محاسبات بار سرمایی، این سالن به 50000 cfm هوا نیاز داریم. سطح مفید دستگاه $79ft^2$ است و با توجه به محدودیت‌های محل نصب، ماکزیمم ارتفاع دستگاه 7ft می‌باشد. چنانچه برای گرمایش فضا از یک عدد کویل آب گرمی که بر روی ایرواشر نصب می‌گردد استفاده شود، مشخصات کویل مورد نظر را به دست آورید. این ایرواشر در زمستان ۵۰٪ هوای تازه را تامین می‌کند، شرایط طرح تهران است.

حل: طبق رابطه محاسبه سریع بار حرارتی که در فصل‌های قبل بیان شد مقدار بار گرمایی فضای مذکور برابر است با:

$$Q = 600 \times AF \times A \times K = 600 \times 0.93 \times 1000 \times 1.2 \approx 670000 \frac{Btu}{h}$$

که AF =0.93 ضریب هواست که برای تهران ۰/۹۳ است. از طرفی ایرواشر مورد نظر بار زیر را می‌تواند تامین کند:

$$Q = AF \times cfm \times \Delta t = 0.93 \times 50000 \times (110 - 47) = 2929500 \frac{Btu}{h}$$

در رابطه فوق $47^{\circ}F$ دمای هوای ورودی به کویل است که در زمستان ۵۰ درصد هوای تازه را تامین می‌کند:

$$T = 25000 \times 70 + 25000 \times 24 = 47^{\circ}F$$

بنابراین دستگاه مورد نظر قادر به تامین بار حرارتی فضاست. در نتیجه با توجه به اینکه سطح کویل حدود $79ft^2$ است، حرارت به دست آمده از هر فوت مربع کویل برابر است با:

$$\frac{Btu}{h.ft^2} = \frac{670000}{79} = 8481$$

با مراجعه به جدول برای درجه حرارت آب ورودی $170^{\circ}F$ هر فوت مربع کویل حرارتی با یک ردیف و هشت پره در هر اینچ حرارتی معادل $14000 \frac{Btu}{h}$ تولید می‌کند و بنابراین انتخاب مناسبی است.

۶. محاسبه سریع مشخصات کویل بخار

برای محاسبه سریع مشخصات کویل بخار از مراحل زیر استفاده می‌شود:

الف) ابتدا سطح مفید کویل با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = A.V \Rightarrow A = \frac{scfm}{fpm}$$

در رابطه فوق Scfm برابر است با:

$$scfm = k \times cfm$$

که k ضریبی است که به درجه حرارت خشک هوای ورودی به کویل بستگی داشته و از جدول زیر به دست می‌آید:

Temp(°F)	K	Temp(°F)	K
0	1.15	60	1.02
10	1.13	70	1
20	1.10	80	0.98
30	1.08	90	0.96
40	1.06	100	0.95
50	1.04	110	0.93

ب) در این مرحله اختلاف دمای خروجی و ورودی کویل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TR = \frac{Btuh}{1.085 \times scfm}$$

چنانچه بخار ورودی در شرایطی غیر از شرایط استاندارد که فشار 5 psig و دمای هوای ورودی صفر درجه فارنهایت است باشد، مقدار TR را با تقسیم بر ضریبی که از جدول زیر به دست می‌آید تصحیح می‌نماییم:

Temperature Rise Correction Factor Air															
	Steam Pressure, Pounds Per Square Inch Gauge														
Entering Air Temp. ºF	0	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200
-40	1.110	1.139	1.177	1.231	1.276	1.316	1.352	1.383	1.439	1.488	1.530	1.603	1.665	1.788	1.855
-30	1.066	1.095	1.187	1.232	1.187	1.272	1.307	1.339	1.395	1.444	1.486	1.559	1.621	1.744	1.841
-20	1.022	1.051	1.089	1.143	1.188	1.228	1.263	1.295	1.351	1.400	1.442	1.515	1.577	1.700	1.796
-10	1.978	1.007	1.044	1.099	1.144	1.184	1.219	1.251	1.307	1.356	1.398	1.471	1.533	1.656	1.752
0	0.934	0.963	1.000	1.055	1.100	1.140	1.175	1.207	1.263	1.311	1.354	1.427	1.489	1.612	1.708
10	0.890	0.919	0.956	0.011	1.056	1.096	1.131	1.163	1.219	1.267	1.310	1.383	1.444	1.538	1.664
20	0.864	0.874	0.912	0.967	1.012	1.052	1.087	1.119	1.175	1.223	1.266	1.339	1.400	1.524	1.620
30	0.802	0.830	0.868	0.922	0.968	1.008	0.043	1.075	1.131	1.179	1.222	1.259	1.356	1.480	1.576
40	0.758	0.786	0.824	0.878	0.924	0.964	0.999	1.031	1.087	1.135	1.178	1.251	1.312	1.436	1.532
50	0.714	0.742	0.780	0.834	0.880	0.920	0.955	0.987	1.043	1.091	1.133	1.207	1.268	1.392	1.488
60	0.670	0.698	0.736	0.790	0.836	0.876	0.911	0.943	0.999	1.047	1.089	1.163	1.224	1.348	1.444
70	0.626	0.654	0.692	0.746	0.792	0.832	0.876	0.899	0.951	1.003	1.045	1.119	1.180	1.304	1.400
80	0.581	0.610	0.648	0.702	0.748	0.788	0.823	0.855	0.911	0.959	1.001	1.074	1.136	1.259	1.356
90	0.537	0.566	0.604	0.658	0.704	0.744	0.879	0.811	0.867	0.915	0.957	1.030	1.092	1.215	1.312
100	0.493	0.522	0.560	0.614	0.659	0.700	0.735	0.867	0.822	0.871	0.913	0.986	1.048	1.171	1.268
110	0.449	0.478	0.516	0.570	0.615	0.656	0.691	0.722	0.778	0.827	0.869	0.962	1.004	1.127	1.224
120	0.405	0.434	0.472	0.526	0.571	0.611	0.647	0.678	0.734	0.783	0.825	0.898	0.960	1.083	1.180
130	0.361	0.390	0.428	0.482	0.527	0.567	0.603	0.634	0.690	0.739	0.781	0.854	0.916	1.039	1.360
140	0.317	0.346	0.384	0.438	0.483	0.523	0.559	0.590	0.646	0.695	0.737	0.810	0.872	0.995	1.092
150	0.273	0.302	0.340	0.394	0.439	0.479	0.515	0.564	0.602	0.651	0.693	0.766	0.828	0.951	1.048

ج) اکنون با مراجعه به جدول زیر بر اساس هوای ورودی در کویل و TR تصحیح شده تعداد ردیف و پره‌های کویل به دست آید.

Air Temperature Rise at 5 PSIG, 0 º EDB (WF of WR Alum. Fins) Face Velocity, SFPM						
Fin	200	400	600	800	1000	1200
104	49.7	37.6	31.8	27.8	25.3	23.2
106	68.1	51.1	42.9	37.7	34.1	31.5
108	77.9	58.1	48.2	42.0	37.8	34.7
110	87.0	64.5	53.0	46.1	41.1	37.2
112	95.0	70.0	57.6	49.6	43.9	39.7
206	15.8	90.8	77.4	69.0	92.7	58.1
208	138.5	109.0	93.1	82.9	4.9	69.0
210	156.5	124.9	106.7	94.3	85.2	78.6
212	171.5	138.1	118.1	104.2	93.9	86.3

مثال: کویل بخار مناسب برای ظرفیت حرارتی 510000 Btu/hr و مقدار هوای 6000 cfm را انتخاب کنید. سرعت هوای روی کویل 800 fpm و گرمای هوای ورودی روی کویل $70^{\circ}F$ است. فشار بخار را 25 psig در نظر بگیرید.

حل: سطح مفید کویل برابر است با:

K برای هوای ورودی با گرمای $70^{\circ}F$ از جدول معادل یک به دست می‌آید. بنابراین مقدار TR برابر است با:

همچنین با توجه به دمای $70^{\circ}F$ برای هوا و فشار 25 psig برای بخار از جدول ضریب تصحیح TR مساوی ۰/۸۷۶ به دست می‌آید، بنابراین TR تصحیح شده برابر است با:

با مراجعه به جدول برای سرعت 800 fpm مشاهده می‌شود که نزدیک‌ترین عدد به TR برای کویل دو ردیفه ۱۰ پره می‌باشد.

همچنین اگر کویل از لوله‌های $\frac{5}{8}$ اینچ ساخته شده باشد، تعداد لوله‌ها در هر ردیف کویل برابر است با:

و از آنجا که کویل دو ردیفه است، تعداد کل لوله‌ها ۴۰ عدد خواهد بود.

۷. برای انتخاب سریع و سرانگشتی کویل‌های آب سرد (Chilled water) می‌توان از جدول زیر استفاده نمود. نحوه استفاده از این جدول مشابه جدولی است که در قسمت محاسبات سرانگشتی کویل آبگرم بیان شد.

ROW		1				2			
FPI		8	10	12	14	8	10	12	14
Water Temp(ºF)	40	4900	5600	6800	7600	8000	12000	13500	14700
	45	4200	4700	5300	5700	8500	9700	10800	12000
	50	3500	3900	4300	4700	6300	7000	7700	8300

ROW		3				4			
FPI		8	10	12	14	8	10	12	14
Water Temp(ºF)	40	15200	17000	18500	20000	19800	20700	22300	23600
	45	12400	13800	15000	16300	11100	17000	18400	19500
	50	9300	10400	11500	12500	11600	13000	14100	15100