GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ISI POMPASI MODELLENMESİ

Mustafa Turhan ÇOBAN

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakultesi, Makina Mühendisliği bölümü, Bornova, İzmir

+90 537-933-33-99

turhan_coban@yahoo.com
www.turhancoban.com

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ISI POMPASI MODELLENMESİ

1. Özet

Isı pompaları çeşitli alanlarda ısıtma amacıyla kullanılabilen sistemlerdir. Bir ısı pompasının temel bileşenleri buharlaştırıcı(evaporatör), yoğuşturucu(kondenser), kompresör ve genleşme vanasıdır. Buharlaştırıcı normal olarak ısıyı çevre şartlarından kaynaklanan bir ortama verir (genellikle su veya atmosferik hava). Isı transferi bu ortamla buharlaştırıcı soğutkanı arasında gerçekleşir. Güneş destekli ısı pompalarında buharlaştırıcı olarak çıplak (cam panel veya izolasyon olmayan) bir veya daha fazla levha kullanılır. Levha güneş enerjisiyle ısınacağı gibi çevre havasından da doğal taşınımla enerji transferi yapabilir. Güneşten gelen enerji buharlaştırıcı sıcaklığını yukarı çekeceğinden toplam sistem performansını arttıracaktır. Göz önüne alınan sistemde kompresör bir gaz motoruyla tahrik edilmektedir. Gaz motorunun atık ısıları (eksoz gaz ısısı ve motor ceket soğutma suyu ısısı) da ısıtma için çekilmektedir. Sistem modellemesinde önce mahale bağımlı olarak buharlaştırıcı panelimize gelen enerji doğal taşınımla kazanılan/kaybedilen enerji ile birlikte irdelenerek bir buharlaştırıcı modeli oluşturulacaktır. Motor ve motor ısı değiştiricileri ve yoğuşturucu, kompresör de ayrı ayrı modellenecektir, tüm bu modeller ısı pompası modeli ile birleştirilerek tüm sistemin değişik şartlarda davranışı irdelenecektir

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi, Güneş enerjisi destekli ısı pompası, ısıl sistem modellemesi

2. Temel kavramlar ve formülasyon

2.1 Güneş ışınımı

Dünya dışı güneş ışınımı değerleri dalgaboyunun fonksiyonu olarak Tablo 2.1 de verilmiştir. Bu değerleri modelimizde girdi olarak kullanılabilmesi için kübik şerit eğri formüllerinden yararlanıldı. Kübik şerit interpolasyon yöntemi ile ilgili biraz bilgi verelim. İnterpolasyon yapmanın diğer bir yolu tüm noktalardan geçen polinomlarla noktaları bağlamaktır. Örneğin üçüncü dereceden bir polinom düşünülebilir.

$r_k(x)=a_k(x-x_k)^3+ b_k(x-x_k)^2+ c_k(x-x_k)+y_k \quad 1\leq k \leq n$

interpolasyon prosesinde polinomların veri noktalarından geçmesi gerekir.

$r_k(x_{k+1})=y_{k+1} \quad 1\leq k \leq n$

aynı zamanda birinci türevlerin de sürekli olması gerekir.

$r'_{k-1}(x_k)= r'_k(x_k) \quad 1\leq k \leq n$

üçüncü dereceden polinom için ikinci türevleri de eşitleyebiliriz.

$r''_{k-1}(x_k)= r''_k(x_k) \quad 1\leq k \leq n$

tüm sistemi çözmek için iki şart daha gerekir. Bu şartlar

$r''_1(x_1)=0$

$r''_{n-1}(x_n)=0$

olarak alınırsa buna doğal kübik şerit interpolayonu adını veririz. Başka sınır şartları belirlememiz de mümkündür.

$h_k=x_{k+1}-x_k \quad 1\leq k \leq n$

Tum bu şartla bir denklem sistemi olarak bir araya toplanırsa :

$a_kh_k^3+ b_kh_k^2+c_kh_k = y_{k+1}-y_k, \quad 1\leq k \leq n$

$3a_{k-1}h_{k-1}^2+ 2b_{k-1}h_{k-1}+c_{k-1}-c_k = 0 \quad , \quad 1\leq k \leq n$

$6a_{k-1}h_{k-1}+ 2b_{k-1}+2b_k = 0 \quad , \quad 1\leq k \leq n$

$2b_0 =0$

$6a_{n-1}h_{n-1}+ 2b_{n-1} = 0$

seti oluşur bu set 3n-3 denklem içerir.bu sayıda denklemi bir arada çözme işlemi matris çözümlemesine oldukça ağır bir yük getirebilir artı hata olasılıklarını arttırır. Toplam çözülmesi gereken denklem sayısını azaltmanın bir yolu değiştirilmiş özel bir üçüncü dereceden polinom kullanmaktır. Eğer kübik polinomumuz

$\mathbf{s_k(x)=a_k(x-x_k)+ b_k(x_{k+1}-x)+ [(x-x_k)^3 c_{k+1} +(x_{k+1}-x)^3 c_k]/(6h_k) \quad 1\leq k \leq n}$

şeklinde verilmiş ise

$s'_k(x)=a_k- b_k+ [(x-x_k)^2 c_{k+1} - (x_{k+1}-x)^2 c_k]/(2h_k) \quad 1\leq k \leq n$

$s''_k(x)=[(x-x_k)\, c_{k+1} + (x_{k+1}-x)\, c_k]/h_k \qquad 1\leq k \leq n$

olur burada a_k ve b_k c_k nın fonksiyonu olarak yazılabilir.

$b_k=[6y_k-h_k c_k]/(6h_k), \qquad 1\leq k \leq n$

$a_k=[6y_{k+1}-h_k^2 c_{k+1}]/(6h_k), \qquad 1\leq k \leq n$

Bu durumda çözülmesi gereken denklem sistemi sadece c_k terimlerine dönüşür.

$$h_{k-1}c_{k-1}+ 2(h_{k-1}- h_k)c_k+ h_k c_{k+1} = 6\left[\frac{y_{k+1}-y_k}{h_k}-\frac{y_k-y_{k-1}}{h_{k-1}}\right] \quad , \quad 1\leq k \leq n$$

bu sistemde toplam n-2 denklem mevcuttur.

$$w_k=\frac{y_{k+1}-y_k}{h_k}, \quad 1\leq k \leq n$$

tanımını yaparsak çözülecek denklem sistemini

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & 2(h_1+h_2) & h_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & 2(h_2+h_3) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2(h_{n-3}+h_{n-2}) & h_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{n-2} & 2(h_{n-2}+h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_{n-2} \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ 6(w_2-w_1) \\ 6(w_3-w_2) \\ \dots \\ 6(w_{n-2}-w_{n-3}) \\ 6(w_{n-1}-w_{n-2}) \\ B \end{bmatrix}$$

burada A ve B kullanıcı tarafından verilmesi gereken sınır şartlarıdır. Bu formülün türevini alacak olursak : **$s'_k(x)=a_k- b_k+ [(x-x_k)^2 c_{k+1} -(x_{k+1}-x)^2 c_k]/(2h_k) \quad 1\leq k \leq n$** şeklini alır. Bu formülün integralini alacak olursak :

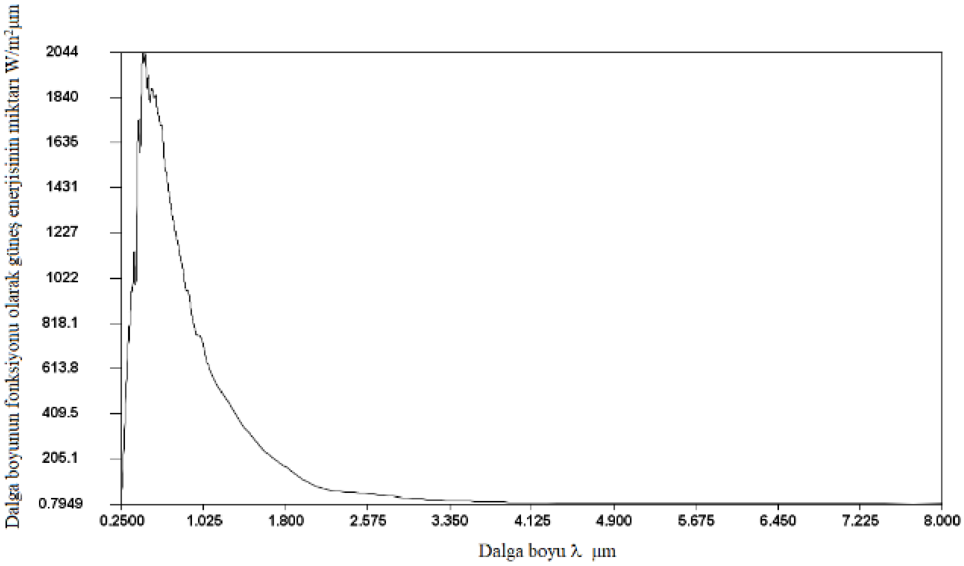
$$\int_a^b S_k(x)dx=\sum_{x=a}^{b} a_k\frac{(x-x_k)^2}{2}-b_k\frac{(x_{k+1}-x)^2}{2}+c_k\frac{(x-x_k)^4}{24h_k}-d_k\frac{(x_{k+1}-x)^4}{24h_k} \qquad a, x_n, x_{n+1}, \dots, b \ \ bölgeleri\ için$$

şerit interpolasyon formülleri kısmi devamlı formül olduğundan aynı kısmi devamlılığı integral işleminde kullanmamız gerekir. Şekil 2.1 de görülen atmosfer dışı spectral enerji yoğunluğunun uydurduğumuz kübik şerit formüllerini kullanrak integralini aldığımızda 1353.9 W/m^{2}μm değerini elde ettik. Bu değer güneş sabiti değeri olan 1367 W/m^{2}μm değerine oldukça yakındır, bu yüzden kübik şerit interpolasyon formülümüzün dünya dışı güneş ışımasını doğru olarak yansıttığını söyleyebiliriz.

Tablo 2.1 dünya dışı güneş ışımasının dalga boyunun fonksiyonu olarak değerleri[2]

λ μm	**Gsc W/m^2**	**λ μm**	**Gsc W/m^2**	**λ μm**	**Gsc W/m^2**
0.25	13.8	0.52	1820.9	0.88	965.7
0.275	224.5	0.53	1873.3	0.9	911.9
0.3	542.3	0.54	1873.4	0.92	846.8
0.325	778.4	0.55	1875	0.94	803.8
0.34	912	0.56	1841.1	0.96	768.5
0.35	983	0.57	1843.2	0.98	763.5
0.36	967	0.58	1844.6	1	756.5
0.37	1130.8	0.59	1782.2	1.05	668.6
0.38	1070.3	0.6	1765.4	1.1	591.1
0.39	1029.5	0.62	1716.4	1.2	505.6
0.4	1476.9	0.64	1693.6	1.3	429.5
0.41	1698	0.66	1545.7	1.4	354.7
0.42	1726.2	0.68	1492.7	1.5	296.6
0.43	1591.1	0.7	1416.6	1.6	241.7
0.44	1837.6	0.72	1351.3	1.8	169
0.45	1995.2	0.74	1292.4	2	100.7
0.46	2042.6	0.76	1236.1	2.5	49.5
0.47	1996	0.78	1188.7	3	25.5
0.48	2028.8	0.8	1133.3	3.5	14.3
0.49	1892.4	0.82	1089	4	7.8
0.5	1918.3	0.84	1035.2	5	2.7

0.51	1926.1	0.86	967.1		



Şekil 2.1 Dünya dışı güneş ışıması değerlerinin kübik şerit interpolasyon algoritmasıyla bulunan değerleri

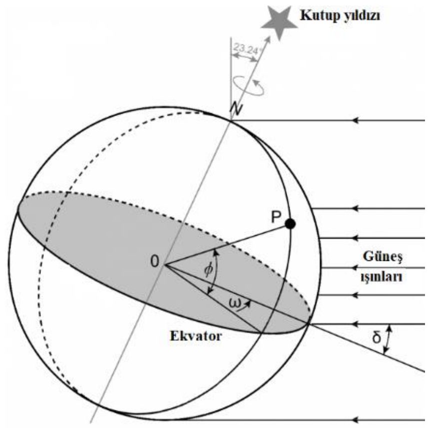
Modelimizi oluşturmak için dünya yüzeyine düşen spectral enerjiyi hesaplamamız gerekir. Bunun için bir dizi ek formülden yararlanacağız. Dünya güneş etrafında dönerken sabit mesafede değildir. Bu yüzdende spectral veya toplam atmosfer dışı güneş enerjisi yoğunluğu

$$G_{on}(\lambda) = G_{st}(\lambda)\left(1 + 0.0333cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \quad (2.1.1)$$

Bu denklemdeki $G_{st}(\lambda)$ spectral güneş enerjisi miktarıdır. Yılın günü n ile ifade edilir ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

i=gün+saat/24+dakika/(24*60)	
Ay	n ayın günü
Ocak	i
Şubat	31+i
Mart	59+i
Nisan	90+i
Mayıs	120+i
Haziran	151+i
Temmuz	181+i
Ağustos	212+i
Eylül	243+i
Ekim	273+i
Kasım	304+i
Aralık	334+i

Eğim açısı (not: açılar derece olarak verilmiştir)

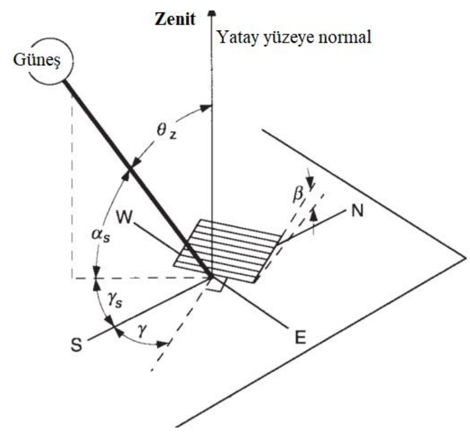


Şekil 2.2 δ Eğim – sapma açısı (declination)

$\delta = 23.45 sin\left(360\frac{284+n}{365}\right)$ (2.1.2)

ϕ Enlem $-90 \leq \phi \leq 90$

ω saat açısı güneşin boylamla yaptığı açı güneş zamanı ile öğle vakti açı sıfır, her bir saat 15 derece, sabah eksi, öğleden sonra artı



Şekil 2.3 θ_z zenit açısı açısı ve diğer ilgili açılar

β yüzey eğim açısı β=0 yatay levha, β>0 ters çevrilmiş levha

γ ufuk açısı yüzeyin yerel meridyenden sapma açısı: güney 0 doğu eksi, batı artı

θ_z zenit açısı: güneşin yatay yüzey normali ile yaptığı açı

$\theta_z = \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)+\sin(\phi)\sin(\delta)$ (2.1.3)

θ yüzeye geliş açısı: güneşin yüzey normali ile yaptığı açı

$\theta = \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta)\text{-}\sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)+\cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega)+$
$\cos(\delta)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega)+\cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega)$ (2.1.4)

Güneş ışınları atmosferden geçerken enerjisinin bir kısmı atmosfer tarafından emilir. Emilen enerjinin bir kısmı uzaya geri yansıtılırken, bir kısmı da atmosferde birikir. Atmosferin geçirme katsayısını direk ışıma ve dolaylı ışıma için vereceğiz. Yüzeye gelen enerji bu iki geçirme faktörünün toplamı olarak belirlenir.

Direk ışıma geçirme faktörü:

$\tau_b = a_0 + a_1 \exp(-\frac{k}{\cos(\theta_z)})$ (2.1.5)

$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2$ (2.1.5a)

$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2$ (2.1.5a)

$k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2$ (2.1.5a)

Tablo 2.2 İklim tipleri için denklem 2.1.5 düzeltme faktörü

İklim tipi	a_0/a_0^*	a_1/a_1^*	k/k^*
tropikal	0.95	0.98	1.02
Ortaenlem yaz	0.97	0.99	1.02
Kutup yaz	0.99	0.99	1.01
Ortaenlem kış	1.03	1.01	1

Dolaylı ışıma geçirme faktörü:

$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b$ (2.1.6)

Toplam ışıma geçirme faktörü:

$\tau = \tau_b + \tau_d$ (2.17)

Bu durumda yer yüzeyindeki yatay bir yüzeye gelen spectral enerji:

$G(\lambda) = G_{st}(\lambda)\left(1 + 0.0333cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right)\cos(\theta_z)\,\tau$ (2.18)

Eğer yüzey eğimli ise:

$G(\lambda) = G_{st}(\lambda)\left(1 + 0.0333cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right)\cos(\theta)\,\tau$ (2.1.9) ifadesini kullanmamız gerekir. Şekil 2.5 de izmir şehri için iki ayrı tarihte yatay bir yüzeye gelen spektral ışınım ve atmosfer dışı spektral ışınım verilmiştir.

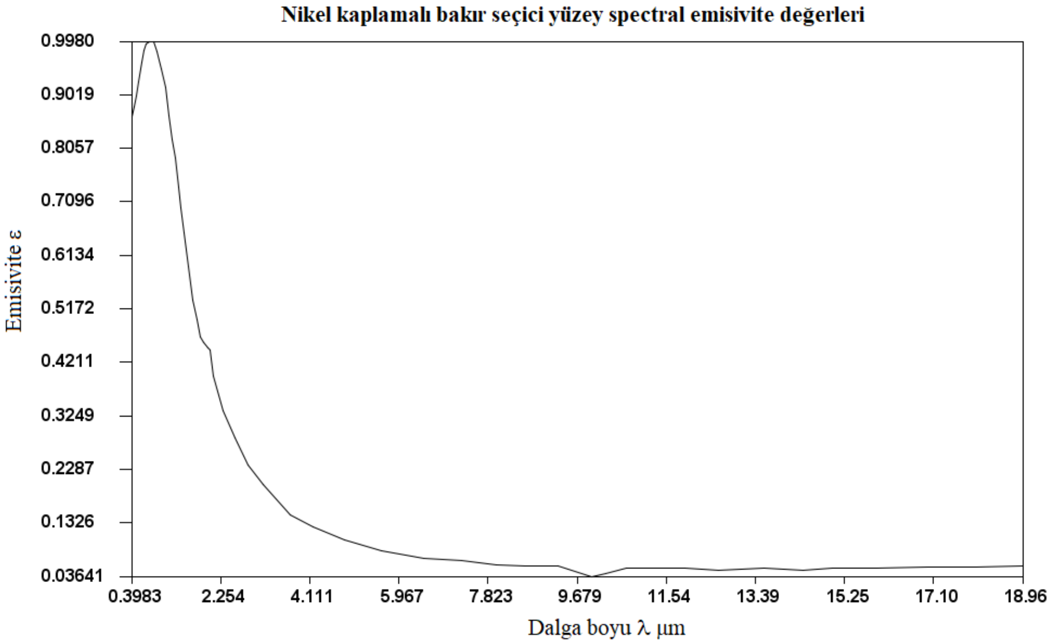
Yüzeye gelen enerjinin bir kısmı yutulurken bir kısmı da geri yansıtılır. Kirshoff yasasına göre yüzey tarafından emilen enerjinin yüzey tarafından yayınlanan enerjiye eşitliği göz önüne alınırsa $\varepsilon_\lambda = \rho_\lambda$ (2.1.10) yazılabilir. Bu denklemdeki ε_λ yayma katsayısı, ρ_λ soğurma katsayısıdır.

Tablo 2.3 de Nikel kaplamalı bakır bir seçici yüzeyin spektral ε_λ yayma katsayısı verilmiştir. Bu değerler kübik şerit interpolasyonu kullanılarak fonksiyon formuna dönüştürülmüştür. Kübik şerit interpolasyonu fonksiyonu olarak ε_λ yayma katsayısı şekil 2.4 de gösterilmiştir.

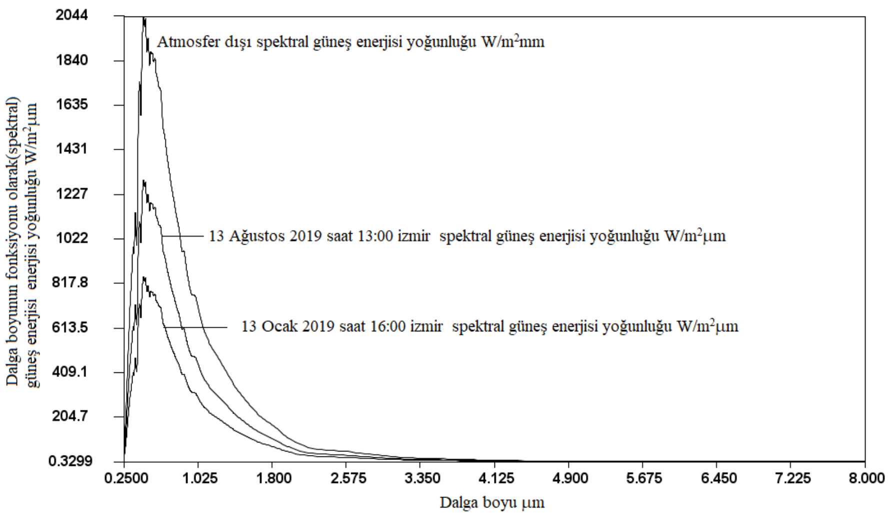
Tablo 2.3 Nikel kaplamalı bakır seçici yüzey spectral yayınlama katsayıları[1]

λ μm	ε spektral yayınlama	**λ μm**	ε spektral yayınlama	**λ μm**	ε spektral yayınlama
0.398317	0.861508	1.500701	0.652796	6.490934	0.069571
0.448808	0.881014	1.584853	0.594278	7.271967	0.063719
0.496494	0.90052	1.669004	0.53381	7.997211	0.055917
0.5554	0.925878	1.753156	0.496749	8.582985	0.053966
0.614306	0.960988	1.842917	0.46554	9.280335	0.053966
0.661992	0.982445	1.907433	0.455787	9.977685	0.036411
0.706872	0.994148	1.997195	0.447984	10.28452	0.040312
0.774194	0.998049	2.027894	0.442133	10.70293	0.050065
0.852735	0.996099	2.111576	0.395319	11.37238	0.050065
0.931276	0.980494	2.306834	0.33485	11.93026	0.050065
1.021038	0.949285	2.55788	0.284135	12.62762	0.048114
1.102384	0.916125	2.83682	0.237321	13.57601	0.050065
1.180926	0.863459	3.143654	0.20026	14.38494	0.048114
1.245442	0.820546	3.701534	0.147594	14.99861	0.050065
1.301543	0.787386	4.175732	0.124187	15.91911	0.050065
1.371669	0.736671	4.845188	0.102731	16.97908	0.052016

1.430575	0.697659	5.598326	0.083225	18.01116	0.052016



Şekil 2.4 Nikel kaplamalı bakır seçici yüzey spectral emisivite değerleri

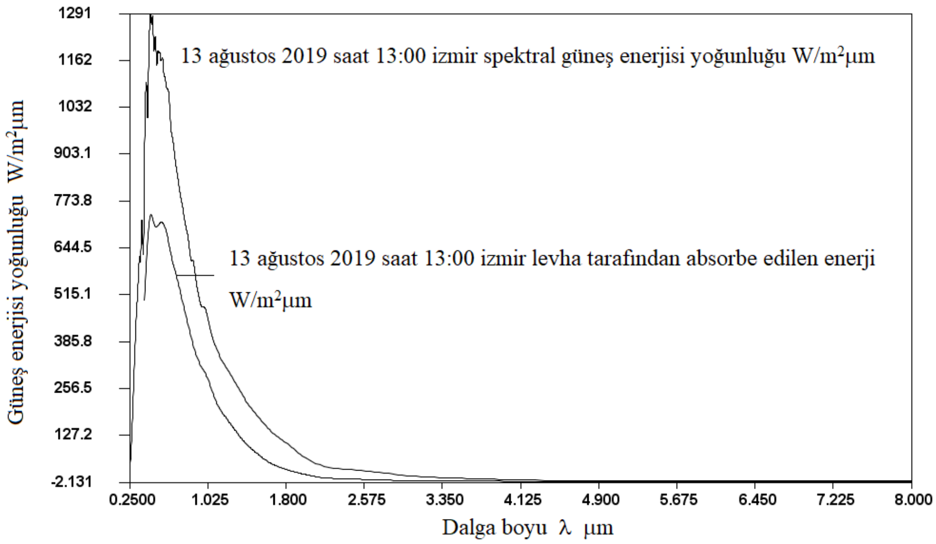


Şekil 2.5 Dünya dışı ve İzmir şehrinde iki ayrı tarihte güneş ışıması değerlerinin kübik şerit interpolasyon algoritmasıyla bulunan değerleri

Levha tarafından absorbe edilen güneş enerjisi:

$Q_r(\lambda)=G(\lambda)\rho_{\lambda}$ (2.1.11)

Bu denklem kullanılarak yeni bir kübik şerit interpolasyon denklemi elde edilebilir. Bu denklemin yine kübik şerit interpolasyon denklemi kullanılarak integrasyonu toplam obserbe edilen güneş enerjisini verecektir. Şekil 2.6 bu yolla hesaplanan gelen ve absorblanan spektral enerjiyi göstermektedir.



Şekil 2.6 İzmir şehrinde 13 ağustos 2019 tarihinde sat 13:00 da levha üzerine gelen ve seçici yüzeyli levha değişimi

Spektral verinin kübik şerit algoritması integrasyon değerleri bu veri için gelen enerjinin 519.3 W/m^2 ve absorblanan enerji için 443.3 W/m^2 olarak bulunmuştur.

Toplam ısıl dengeyi hesaplamak için yüzeyden yayılım yoluyla çevreye verilen enerjiyi de göz önüne almak zorundayız. Bu enerjiyi temel olarak plank yasasından yararlanarak bulabiliriz. Plank yasası

$$\pi I_{\lambda,b}(\lambda,T)=E_{\lambda,b}(\lambda,T)=\frac{2\pi h c_0^2}{n^2\lambda^5[exp(hc_0/(n\lambda kT)-1]}$$

Bu denklemdeki katsayılar : k=1.380649x10^{-23} J/K is Boltsmann sabiti, h=6.62607015x10^{-34} Js Planck sabiti, c0= 2.99792458x10^{8} m/s boşluktaki ses hızı ve n kırılma indeksidir. Bu sabitleri bir araya toplarsak:

$$\pi I_{\lambda,b}(\lambda,T)=E_{\lambda,b}(\lambda,T)=\frac{C_1}{n^2\lambda^5[exp(C_2/(n\lambda T)-1]}$$

$$\frac{E_{\lambda,\beta}(\lambda,T)}{n^3T^5}=\frac{C_1}{(n\lambda T)^5[exp(C_2/(n\lambda T)-1]}$$

h		6.6260701500E-34	J s		
k		1.3806490000E-23	J/K		
co		2.9979245800E+08	m/s		
C1	$2\pi h c_0^2$	3.7417718522E-16	Wm^2	3.7417718522E+08	W μm^4/m^2
C2	hc_0	1.4387768775E-02	W/mK	1.4387768775E+04	W/μmK

Denklem tüm dalga boyu bölgesi için integre edildiğinde

$$\frac{E_b(T)}{n^3T^5}=\int_{\lambda=0}^{\infty}\frac{C_1 d\lambda}{(n\lambda T)^5[exp(C_2/(n\lambda T)-1]}$$ Converting variables gives:

$$\xi=\frac{C_2}{n\lambda T} \quad \lambda=\frac{C_2}{n\xi T} \quad d\lambda=-\frac{C_2}{n\xi^2 T}d\xi$$

$$\frac{E_b(T)}{n^3T^5}==\int_{\xi=\infty}^{0}\frac{C_1\xi^5}{C_2^5}\left(-\frac{C_2}{\xi^2 T}d\xi\right)$$

$$E_b(T)=\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)n^2T^4\int_{\xi=0}^{\infty}\frac{\xi^3}{[exp(\xi)-1]}d\xi\right]$$

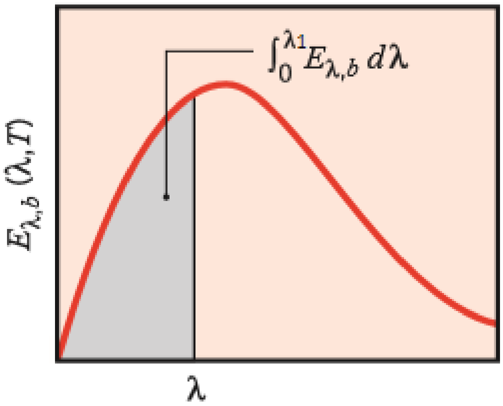
$$\int_{\xi=0}^{\infty}\frac{\xi^3}{[\exp(\xi)-1]}d\xi=\int_{\xi=0}^{\infty}\frac{e^{-\xi}\xi^3}{e^{-\xi}[e^{\xi}-1]}d\xi=\int_{\xi=0}^{\infty}\frac{e^{-\xi}\xi^3}{[1-e^{-\xi}]}d\xi=\int_{\xi=0}^{\infty}\xi^3\sum_{n=1}^{\infty}e^{-n\xi}d\xi$$

$$E_b(T)=\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)\frac{\pi^4}{15}\right]n^2T^4=\sigma n^2T^4$$

$$\sigma=\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)\frac{\pi^4}{15}\right]=5.6703744192\text{x}10^{-8} \quad W/m^2K^4$$

Sonucuna ulaşılır. Bu denkleme Stephen-Boltzman denklemi adını veriyoruz. DEnklemi tüm spectrum yerine 0 dan belli bir spectrum bandı için çözecek olursak:

$E_{(0\to\lambda1),\mathrm{b}}(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda1} E_{\lambda,\mathrm{b}}(T)d\lambda$



Spektral bir band için siyah cisim yayılım enerjisi genellikle toplam enerjiye (tüm dalga boyları) oranı olarak verilir. Bu orana siyah cisim ışınım fonksiyonu adını veriyoruz.

$F_{(0\to\lambda1)}(T) = \frac{E_{(0\to\lambda1),\mathrm{b}}(T)}{E_{\mathrm{b}}(T)} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda1} E_{\lambda,\mathrm{b}}(T)d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} E_{\lambda,\mathrm{b}}(T)d\lambda} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda1} E_{\lambda,\mathrm{b}}(T)d\lambda}{\sigma n^2 T^4}$

$\xi = \frac{C_2}{\mathrm{n\lambda T}}$ $\quad \lambda = \frac{C_2}{\mathrm{\xi n T}}$ $\quad d\lambda = -\frac{C_2}{n\xi^2\mathrm{T}}d\xi$

$$F_{(0\to\lambda1)}(T) = \frac{E_{(0\to\lambda1),\mathrm{b}}(T)}{E_{\mathrm{b}}(T)} = \frac{\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)\int_{\xi=\xi1}^{\infty}\frac{\xi^3}{[e^{\xi}-1]}d\xi\right]n^2T^4}{\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)\frac{\pi^4}{15}\right]n^2T^4} = \frac{15}{\pi^4}\int_{\xi=\xi1}^{\infty}\frac{\xi^3}{[e^{\xi}-1]}d\xi$$

$F_{(0\to\lambda1)}(T) = 1 - \frac{15}{\pi^4}\int_{\xi=0}^{\xi1}\frac{\xi^3}{[e^{\xi}-1]}d\xi = 1 - \frac{15}{\pi^4}\int_{\xi=0}^{\xi1}\xi^3\sum_{n=1}^{\infty}e^{-n\xi}\,d\xi$

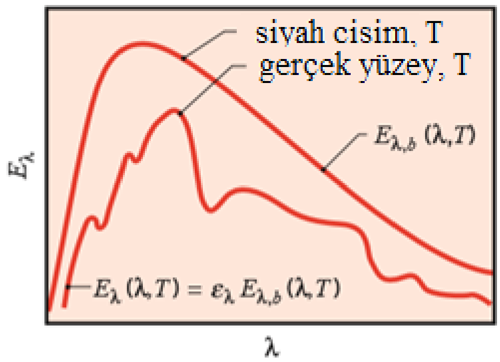
$F_{(0\to\lambda1)}(T) = 1 - \frac{15}{\pi^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}[-e^{-n\xi}((n\xi)^3 + 3(n\xi)^2 + 6(n\xi) + 6)] - 1$

$F_{(0\to\lambda1)}(T) = \frac{15}{\pi^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{-n\xi}}{n}\left[\left(\xi^3 + \frac{3\xi^2}{n} + \frac{6\xi}{n^2} + \frac{6}{n^3}\right)\right]$ bu denklemde $\xi = \frac{C_2}{\lambda\mathrm{T}}$ dir.

Siyah cisim yerine gri cismin yaymasını hesaplamak istersek spektral yayma katsayısını da göz önüne almamız gerekir. Toplam yayma katsayısı spektral yayma katsayısının fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty}\int_{\Omega}[\varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)I_{\lambda\mathrm{b}}(T)d\lambda]\cos(\theta)d\Omega}{\sigma n^2 T^4}$

$$\varepsilon(T) = \frac{1}{\pi}\int_{\Omega}\varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)\cos(\theta)d\Omega = \frac{1}{\pi}\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2}\varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)\sin(\theta)\cos(\theta)d\theta d\phi$$



i

$\varepsilon(T) = \frac{\pi\int_{\lambda=0}^{\infty}\varepsilon_\lambda(T)I_{\lambda\mathrm{b}}(T)d\lambda}{\sigma n^2 T^4} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty}\varepsilon_\lambda(T)E_{\lambda\mathrm{b}}(T)d\lambda}{\sigma n^2 T^4}$

$$\varepsilon\,(T) = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} E_{\lambda}(\lambda, T)d\lambda}{E_{\beta}(T)} = \frac{\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right) n^2T^4 \int_{\xi=0} \frac{\varepsilon(\xi)\xi^3}{[e^{\xi}-1]} d\xi\right]}{\left[\left(\frac{C_1}{C_2^4}\right)\frac{\pi^4}{15}\right] n^2T^4} = \frac{15}{\pi^4}\int_{\xi=0}^{\infty} \frac{\varepsilon(\xi)\xi^3}{[e^{\xi}-1]} d\xi$$

Bu denklemin çözümü için analitik bir metod mevcut değildir. Sayısal yöntemlerle çözülmesi gerekir. Çözüm için sayısal integral veya sonlu farklar yöntemi ile integral alma kullanılabilir.

$$\varepsilon\,(T) = \sum_{i=0}^{\infty} \left(F_{(0\to\lambda i)}(T) - F_{(0\to\lambda i+1)}(T)\right) \varepsilon_{\lambda i}(\lambda i, T)$$

Spektral yayma kaysayısı ile ilgili verinin tüm dalga boylarında mevcut olmayacağı göz önüne alınırsa mevcut olan λ1→λ2 bölgesi için normalizasyona gidilebilir.

$$\varepsilon\,(T) = \frac{15}{\pi^4\left(F_{(0\to\lambda 2)}(T) - F_{(0\to\lambda 1)}(T)\right)} \int_{\xi=\xi 1}^{\xi 2} \frac{\varepsilon(\xi)\xi^3}{[e^{\xi}-1]} d\xi \quad \text{burada } \xi = \frac{C_2}{n\lambda T}$$

$$\varepsilon\,(T) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \left(F_{(0\to\lambda i)}(T) - F_{(0\to\lambda i+1)}(T)\right) \varepsilon_{\lambda i}(\lambda i, T)}{\left(F_{(0\to\lambda 2)}(T) - F_{(0\to\lambda 1)}(T)\right)}$$

Şekil 2.4 de verilen seçici yüzeyin spektral yayma katsayısı değerleri ile hesaplandığında T=276.17 K buharlaştırıcı yüzey sıcaklığında toplam yayma katsayısı $\varepsilon\,(T) = 0.2027311304277215$ olarak bulunmuştur. Bu değer yüzeyden yayılan ışınım değeri olarak Q=68.80950533483798 W/m^2 verir. Bu durumda evaporatörün net güneş enerjisi absorblaması Q=443.3-68.81=374.49 W/m^2 olacaktır.

2.2 Buharlaştırıcı doğal taşınım ısı transferi ve yaş havanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri

Buharlaştırıcı temel olarak düz levha olarak dizayn edilmiştir. Buharlaştırıcıya güneşten gelen enerjinin yanı sıra doğal taşınımla havadan da enerji transferi mevcuttur. Doğal taşınım enerji transferi aşağıdaki formüllaerle hesaplanabilir:

Levhanın üst yüzeyi için(Buharlaştırıcı levha sıcaklığı hava sıcaklığının altındadır) :

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.27Ra_L^{1/4} \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}$$

Levhanın alt yüzeyi için(Buharlaştırıcı levha sıcaklığı hava sıcaklığının altındadır) :

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.54Ra_L^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$$

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.15Ra_L^{1/4} \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$$

Isı transferi $Q = h(T_s - T_\infty)$ W/m^2 olarak hesaplanabilir.

Denklemlerdeki Rayleigh (Ra_L) sayısı $Ra_L = \frac{g\rho\beta(T_s - T_\infty)}{\mu\alpha}$ şeklindedir. Denklemdeki g yerçekimi ivmesi olup standart değeri 9.806 m/s^2 olarak alınabilir. ρ yoğunluk(kg/m^3) β adyabatik genleşme katsayısıdır. μ viskozite (Pas) ve $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ ısıl difizivite değeridir. k ısıl iletim sabiti, C_p sabit basınçta özgül ısı ismini alır. Dış hava olarak gerçek gaz yaş hava alınmıştır. Gerçek gaz için yaş havanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri IAPWS (The international Association for the Properties of Water and Steam-Uluslararası su buhar derneği) denklemi kullanılarak hesaplanır[10,11].

$$f^{AV}(A, T, \rho) = (1 - A)f^V(T, \rho^V) + Af^A(T, \rho^A) + f^{mix}(A, T, \rho)$$

Bu denklemdeki $\rho^A = A\rho$ ve $\rho^V = (1 - A)\rho$ kuru hava ve su buharının yoğunluğudur. A (kg kuruhava/kg toplam). Nemli hava içerisindeki kuru hava miktarıdır. Denklem Helmholtz serbest enerji formunda verilmiştir. $f^V(T, \rho^V)$ su buharı için Helmholtz serbest enerjisi , $f^A(T, \rho^A)$ kuru hava için Helmholtz serbest enerjisi ve $f^{mix}(A, T, \rho)$ kuru hava ve su buharı moleküllerinin etkileşimi için Helmholtz serbest enerji denklemidir. Su buharının denklemi

$$\frac{f^V(T, \rho^V)}{RT} = \phi^V(\delta, \tau) = \phi^{V0}(\delta, \tau) + \phi^{Vr}(\delta, \tau)$$

$\phi^{V0}(\delta,\tau) = \ln(\delta) + n_1^0 + n_2^0\tau + n_3^0\ln(\tau)\sum_{i=4}^{8} n_i^0 ln\left[1 - e^{-(\gamma_i^o)^2}\right]$

$\phi^{Vr}(\delta,\tau) = \sum_{i=1}^{7} n_i\delta^{d_i}\tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{51} n_i\delta^{d_i}\tau^{t_i}\, e^{-\delta^{c_i}} + \sum_{i=52}^{54} n_i\delta^{d_i}\tau^{t_i}\, e^{-\alpha_i(\delta-\epsilon_i)^2-\beta_i(\tau-\gamma_i)^2} + \sum_{i=55}^{56} n_i\,\Delta^{b_i}$

Bu denklemdeki $\delta = \rho^V/\rho_c^V$ ve $\tau = T_c^V/T$ Su buharı için kritik değerler: T_c^V=647.096 K, ρ_c^V=322 kg/m^3 and R=0.46151805 kJ/(kgK)

Kuru havanın denklemi:

$f^A(T,\rho^A) = \frac{R^L T}{M_A}\alpha^A(\delta,\tau) = \frac{R^L T}{M_A}\left[\alpha^{A0}(\delta,\tau) + \alpha^{Ar}(\delta,\tau)\right]$

$\alpha^{A0}(\delta,\tau) = \ln(\delta) + \sum_{i=1}^{5} n_i^0\tau^{i-4} + n_6^0\tau^{1.5} + n_7^0\ln(\tau) + n_8^0\ln[1-\exp(-n_{11}^0\tau)] + n_9^0\ln[1-\exp(-n_{12}^0\tau)] + n_{10}^0\ln[2/3-\exp(-n_{13}^0\tau)]$

$\alpha^{Ar}(\delta,\tau) = \sum_{k=1}^{10} n_k\delta^{i_k}\tau^{j_k} + \sum_{k=11}^{19} n_k\delta^{i_k}\tau^{j_k}\exp(-n_k\delta^{t_k})$

Burada $\tau = \frac{T_A^*}{T}$ $T_A^* = 132.6312\ K$ $\delta = \frac{\rho^A}{\rho_A^*}$ $\rho_A^* = 10447.7\ mol/m^3$

Etkileşim Helmholtz enerjisinin denklemi:

$f^{mix}(A,T,\rho) = \frac{2A(1-A)\rho RT}{M_A M_W}\left\{B^{AW}(T) + \frac{3}{4}\rho\left[\frac{A}{M_A}C^{AAW}(T) + \frac{(1-A)}{M_W}C^{AWW}(T)\right]\right\}$

$B^{AW}(T) = b^*\sum_{i=1}^{3} c_i\bar{T}^{d_i}$

$C^{AAW}(T) = c^*\sum_{i=0}^{4} a_i\bar{T}^{-i}$

$C^{AWW}(T) = -c^* exp[\sum_{i=0}^{4} b_i\bar{T}^{-i}]$ 2

Denklemde $\bar{T} = \frac{T}{100}$

Denklem katsayıları için referanslara bakınız.

kuru havanın vizkozite ve ısıl iletim katsayılarının hesaplanması için Kadoya[12] denklemi kullanılmıştır.

$\eta_0(T_r) = A_0T_r + A_1T_r^{0.5} + A_2 + \frac{A_3}{T_r} + \frac{A_4}{T_r^2} + \frac{A_5}{T_r^3} + \frac{A_6}{T_r^4}$ 3.14

$\Delta\eta(\rho_r) = \sum_{i=1}^{4} B_i\rho_r^i$ 3.15

$\eta(T_r,\rho_r) = H\left[\eta_0(T_r) + \Delta\eta(\rho_r)\right]$ 3.16

$k_0(T_r) = C_0T_r + C_1T_r^{0.5} + C_2 + \frac{C_3}{T_r} + \frac{C_4}{T_r^2} + \frac{C_5}{T_r^3} + \frac{C}{T_r^4}$ 3.17

$\Delta k(\rho_r) = \sum_{i=1}^{4} D_i\rho_r^i$

$k(T_r,\rho_r) = \Lambda[k_0(T_r) + \Delta k(\rho_r)]$

Where $\rho_r = \rho/\rho^*$ $T_r = T/T^*$

Su buharının vizkozite ve ısıl iletkenlik katsayıları için IAPWS 97[14] formüllerinden yararlanılmıştır.

Vizkozite denklemi::

$\eta(\rho,T) = \psi(\delta,\theta) = \eta^*\left[\psi_0(\theta)\psi_1(\delta,\theta)\right]$

denklemde $\eta^* = 10^{-6}\ Pas$ $\delta = \frac{\rho}{\rho^*}$ $\theta = T/T^*$

$T^* = T_c = 647.096\ K$ $\rho^* = \rho_c = 322\ kg/m^3$

$$\psi_0(\theta) = \theta^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{4} n_i^0\,\theta^{1-i}\right]^{-1}$$

$\psi_1(\delta,\theta) = exp\left[\delta\sum_{i=1}^{21} n_i\,(\delta-1)^{I_i}\left(\frac{1}{\theta}-1\right)^{J_i}\right]$

Hal denkleminden tüm termodinamik özellikler türevler olarak hesaplanabilir.

Basınç(kPa): $P(A,T,ro) = \rho^2\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho}$

Entropi (kJ/(kgK)) : $s(T,ro) = -\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial T}$

Enthalpi (kJ/kg) : $h(T,ro) = f^{AV}(A,T,\rho) - T\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial T} + \rho\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho}$

Sabit basınçta özgül ısı C_p(kJ/(kgK)) :

$$C_p(T,ro) = -T\frac{\partial^2 f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial T\partial T} + \frac{T\rho\left[\frac{\partial^2 f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial T\partial\rho}\right]^2}{\left(2\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho}+\rho\frac{f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho\partial\rho}\right)}$$

Isıl genleşme katsayısı:

$$\beta(A,T,ro) = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_P = \frac{\frac{\partial^2 f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial T\partial\rho}}{2\frac{\partial f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho}+\rho\frac{\partial^2 f^{AV}(A,T,\rho)}{\partial\rho\partial\rho}}$$

(ısıl genleşme katsayısı için not: Hal denklemi olarak ideal gaz denklemi kabul edildiğinde ısıl genleşmen katsayısı β =1/T yaklaşımı ile hesaplanabilir)

2.3 Soğutkanların termodinamik özellikleri

Evaporatör ve kondenseri modellerken boru içinden soğutkan akmaktadır. Bu yüzden soğutkanın termodinamik ve termofiziksel modellerine de ihtiyacımız vardır. Uluslar arası standartlar enstitüsü (ISO) soğutkanların termodinamik özelliklerini hesaplayan çok çeşitli formüller olması nedeniyle ve bu özelliklerdeki değişmelerin uluslar arası ticareti etkileyebileceğini göz önüne alarak standart hal denklemleri yayınlamış ve mümkün olduğuna bu denklemlerin kullanılmasını istemiştir. Standartta da belirtildiği gibi bu bitmemiş bir prosestir, tüm soğutkanları kapsamamaktadır, ancak durumun önemi nedeniyle bir başlanfıç olarak 14 soğutkanın termodinamiközelliklerini veren veri ile birlikte denklemler bir standart olarak yayınlanmıştır. Standartta Aşağıdaki soğutkanların verileri yer almıştır:

R744(Karbondiaksit), R717(Amonyak),R12(diklorodiflorometan),R22(klorodiflorometan),R32(Diflorometan), R123(2,2-dikloro,1,1,1trifloroetan),
R125(Pentafloroetan),R134a(1,1,1,2tetrafloroethan),R143a(1,1,1,trifloroetan),R152a(1,1 difloroetan),R404A-R125/142a/134a(23/25/52),R407C-R32/125/134a(23/25/52),R410A-R32/125(50/50),r507a-r125/143A(50/50)
Standart temel hal denklemi olarak Helmholtz serbest enerji denklemi kullanmıştır. Bu denklem saf soğutkanlar için :

$$\phi = \frac{A}{RT} = \phi_{id} + \phi_r$$

Denklemdeki "id" alt indisi ideal gaz "r" alt indisi gerçek gaz kısmını vermektedir.

$$\phi_r = \sum_k N_k / \tau^{t_k}\delta^{d_k}\exp\left[-\alpha_k(\delta-\varepsilon_k)^{l_k}\right]\exp\left[-\beta_k(\tau-\gamma_k)^{m_k}\right]$$

Buradaki

τ	Boyutsuz sıcaklık parametresi T^*/T
T^*	Normalizasyon faktörü genellikle kritik sıcaklığa eşittir
δ	Boyutsuz yoğunluk ρ/ρ^* $(1/(v\,\rho^*)$
ρ^*	Normalizasyon faktörü genellikle kritik yoğunluğa eşittir
N_k	Sayısal eğri uydurma katsayıları
$\alpha_k,\beta_k,\varepsilon_k,\gamma_k$	Eğri uydurmalarla özel soğutkan için belirlenmiş çarpanlar
t_k,d_k,l_k,m_k	Eğri uydurmalarla özel soğutkan için belirlenmiş üst katsayıları

Denklemin ideal gaz terimi :

$$\phi_{id} = \frac{h_{ref}}{RT} - \frac{s_{ref}}{R} - 1 + \ln\left(\frac{RT\rho}{P_{ref}}\right) + \frac{1}{RT}\int_{T_{ref}} C_{p,id}dT - \frac{1}{R}\int_{T_{ref}}^{T}\frac{C_{p,id}}{T}dT$$

Bu denklemdeki

h_{ref} : ideal gaz referans entalpisi ()

s_{ref} : ideal gaz referans entropisi (Genellikle 0 C de doymuş sıvı entalpisi olarak 1 kJ/kg K olarak seçilir)

h_{ref} genellikle 0 C de doymuş sıvı entalpisi olarak 200 kJ/kg K olarak seçilir, Genellikle 0 C de doymuş sıvı entalpisi olarak 1 kJ/kg K olarak seçilir. Ancak değişik referanslarda aynı aynı entalpi entropi değerlerini verme şartıyla seçilebilir. Denklem aynızamanda ideal gaz sabit hacimde ısı kapasitesinin bilinmesini gerektirmektedir. Bu ısı kapasitesi :

$$\frac{C_{p,id}}{R} = c_0 + \sum_k c_k T^{t_k} + \sum_k a_k\frac{u_k^2\exp(u_k)}{[\exp(u_k)-1]^2}$$

Buradaki

$u_k = \frac{b_k}{T}$, c_k, a_k ve t_k soğutkana eğri uydurma ile elde edilen katsayılardır.

Bazı denklemler için ideal gaz ek Helmholtz serbest enerji komponenti:

$$\phi_{id} = d_1 + d_2\tau + \ln\delta + d_3 \ln\tau + \sum_k d_k \tau^{t_k} + \sum_k a_k \ln[1 - \exp(-\tau\lambda_k)]$$

Burada d_1, d_2 ,d_3, d_k ,λ_k, t_k katsayılardır. Eşdeğer C_p fonksiyonunu şeklinde de veriilebilir.

$$\frac{C_{p,id}}{R} = d_0 + 1 - \sum_k d_k t_k (t_k - 1)\left(\frac{T^*}{T}\right)^{t_k} + \sum_k a_k \frac{u_k^2 \exp(u_k)}{[\exp(u_k) - 1]^2}$$

Bazı soğutkanlar için Helmholtz serbest enerji denklemine üçüncü bir terim daha ekliyebiliriz.

$$\phi = \frac{A}{RT} = \phi_{id} + \phi_r + \phi_{crit}$$

$$\phi_{crit} = \sum_k N_k \delta \Delta^{b_k} \Psi$$

Burada

$$\Delta = \theta^2 + B_k \left[(\delta - 1)^2\right]^{a_k}$$

$$\theta = (1 - \tau) + A_k \left[(\delta - 1)^2\right]^{1/(2\beta_k)}$$

$$\Psi = \exp\left[-C_k(\delta - 1)^2 - D_k(\tau - 1)^2\right]$$

Denklemdeki N_k, A_k, B_k, C_k, D_k, α_k, β_k terimleri soğutkan için eğri uydurma terimleridir.
Soğutkan Helmholts serbest enerji denklemi elde edildikten sonra türevleri kullanılarak değişik termodinamik özellikler türetilir.

$$P = RT\rho\left(1 + \delta\frac{\partial\phi_r}{\partial\delta}\right)$$

$$u = RT\left(\tau\frac{\partial\phi_{id}}{\partial\tau} + \tau\frac{\partial\phi_r}{\partial\tau}\right)$$

$$h = RT\left(1 + \tau\frac{\partial\phi_{id}}{\partial\tau} + \tau\frac{\partial\phi_r}{\partial\tau} + \delta\frac{\partial\phi_r}{\partial\delta}\right)$$

$$s = R\left(-(\phi_{id} + \phi_r) + \tau\frac{\partial\phi_{id}}{\partial\tau} + \tau\frac{\partial\phi_r}{\partial\tau}\right)$$

$$g = RT\left(1 + \phi_{id} + \phi_r + \delta\frac{\partial\phi_r}{\partial\delta}\right)$$

$$C_v = R\left(-\tau^2\frac{\partial^2\phi_{id}}{\partial\tau^2} - \tau^2\frac{\partial^2\phi_r}{\partial\tau^2}\right)$$

$$C_p = C_v + R\frac{\left(1 + \delta\frac{\partial\phi_r}{\partial\delta} - \delta\tau^2\frac{\partial^2\phi_r}{\partial\tau\partial\delta}\right)}{1 + 2\delta\frac{\partial\phi_r}{\partial\delta} + \delta^2\frac{\partial^2\phi_r}{\partial\delta^2}}$$

Doyma bölgesi denklemleri hal denkleminden

$$P(\tau, \delta_{sıvı}) = P(\tau, \delta_{gaz}) \qquad (2.2.5.19)$$

$$g(\tau, \delta_{sıvı}) = g(\tau, \delta_{gaz}) \qquad (2.2.5.20)$$

Denklemleri kullanarak da elde edilebilir. Üst bölümde bu denklemleri kübik şerit eğri uydurmasıyla elde ederek kullandığımızı burada hatırlatalım.

Eğer soğutkanımız saf bir akışkan değil, bir akışkanlar karışımı ise karışım kurallarını kullanarak karışımın termodinamik özelliklerini karışımın içindeki saf maddelerin termodinamik özelliklerinden elde etmemiz gerekir.

$$\phi_{mix} = \frac{A}{RT} = \phi_{mix,id} + \phi_{mix,r}$$

$$\phi_{mix,id} = \sum_{i=1}^{n} \left[x_i \phi_{i,id} + x_i \ln x_i \right] + f_3 + f_4 / T$$

x_i i inci komponentin mol oranı $x_i = \dfrac{N_i}{\sum_{i=1}^{N} N_i}$

$x_i \ln x_i$ Entropi teriminden gelen karışım terimi

f_3 ve f_4 terimleri karışım entalpisi ve entropisinin saf sıvılarda olduğu gibi referans değerinde (0 C da sıvı formunda) entalpi değerini 200 kJ/kg , Gerçek gaz komponenti de

$$\phi_{mix,r} = \sum_{i=1}^{n} x_i \phi_{i,r} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} x_i x_j \phi_{ij}$$

$$T^* = \sum_{i=1}^{n} x_i T_i^* + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} x_i x_j \zeta_{ij} \qquad \delta = \frac{\rho_{mix}}{\rho^*}$$

$$\frac{1}{\rho^*} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{\rho_i^*} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} x_i x_j \xi_{ij}$$

Denklemlerdeki ξ_{ij} ve ζ_{ij} iki gazın birlikte olmasından dolayı moleküler çekim kuvvetlerinden doğan ikili katsayılardır. T_i^* ve ρ_i^* saf sıvıların katsayıları olup genellikle kritik değerler olarak alınırlar. ϕ_{ij} fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\phi_{ij} = F_{ij} \sum_{k} N_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} \exp(-\delta^{l_k})$$

2.4 Soğutkanların 1 ve 2 fazlı ısı değişim formülleri

Güneş enerji destekli ısı pompası modelimizde buharlaştırıcıyı(evaporator) göz önüne aldığımızda soğutkan boru içinde doymuş bölgede sıvı gaz karışımı olarak girmekte, tamamen buharlaşma olduktan sonra tek fazlı buhar fazında çıkmaktadır. Yoğuşturucuda(condenser) ise boru içinde tek fazlı buhar olarak girmekte, sonar doyma bölgesinde yoğuşmakta ve tek fazlı sıvı olarak çıkmaktadır. Bu yüzden modelimizde boru içi tek fazlı ısı transferi, boru içi kaynama ve boru içi yoğuşma denklemlerine gereksinme bulunmaktadır.

Boru içi kaynama için Turgut, Asker, Coban[15] Korelasyonu

Bu model özellikle R-134a akışkanı için geliştirilmiştir. Bu Diğer akışkanlara da uyaralanabilir, ancak hata miktarı artar.

$Re_l = \frac{m(1-x)D}{A_{kesit}\mu_l} = \frac{G(1-x)D}{\mu_l}$ Burada x doygunluk derecesidir. $G = \frac{m}{A_{cross-section}}$ kütlesel akıştır kütlesel debinin kesit alanına bölümünden oluşur (kg/sm^2) ve m kütlesel debidir (kg/s)

Martinelli parametresi:

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.1}$$

Froude sayısı:

$Fr_l = \frac{G^2}{\rho_l^2 gD}$ denklemdeki g yerçekimi sabiti olup değeri 9.806 m/s^2 olarak alınabilir.

Konvektif kaynama ağırlıklı rejim için ısı transferi denklemi

$$h_{cb} = \left(0.023 \left(\frac{k_l}{D}\right) Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4}\right) \left(C_1 \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{C_2}\right)$$

$$h_{nb} = C_3 h_{Goren}^{C_4} P_r^{C_5} (1-x)^{C_6}$$

Denklemdeki h_{Goren} Gorenflo [51] denklemidir Gorenflo denklemi aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$h_{Goren} = h_0 F_{PF} \left(\frac{q}{q_0}\right)^{nf} \left(\frac{R_p}{R_{p0}}\right)^{0.133}$$

Denklemdeki h_0 referans ısı transfer katsayısıdır(R134a, için h_0 = 4500 J/kg); q_0 = 20,000 W/m^2 referans ısı akısı; p_{r0} = 0.1 referans indirgenmiş basınçtır. R_p yüzey pürüzlülüğü ve R_{p0} referans yüzey pürüzlülüğüdür. F_{PF} baınç düzeltme faktörüdür:

$F_{PF} = 1.2P_r^{0.27} + \left(2.5 + \frac{1}{1-P_r}\right) P_r$ where $P_r = \frac{P}{P_{critical}}$ is eudced pressure

Üstsel katsayı nf $nf = 0.9 - 0.3P_r^{0.3}$ denklemi ile tanımlanmıştır.

Toplam taşınım ısı transferi:
$h_{tp} = \sqrt{(h_{cb}^2 + h_{nb}^2)}$ denklemiyle hesaplanır.
Korelasyonda kullanılan katsayılar:

Constants	Values
C_1	1.63366
C_2	0.94494
C_3	9.86075
C_4	0.80244
C_5	0.28773
C_6	0.40317

Rohsenow boru içi film yoğuşma denklemi[17]

$Re_l = \frac{m(1-x)D}{A_{cross-section}\mu_l} = \frac{G(1-x)D}{\mu_l}$ burada x doygunluk derecesi, $G = \frac{m}{A_{cross-section}}$ kütlesel akış oranı (kg/sm^2)

$Re_v = \frac{mxD}{A_{cross-section}\mu_l} = \frac{GxD}{\mu_l}$

Eger $Re_l > 35000$

Martinelli parametresi:

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9}\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5}\left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.1}$$

$$Nu_D = \frac{h_D D}{k_l} = 0.15\frac{Pr_l Re_l^{0.9}}{F}\left(\frac{1}{X_{tt}} + \frac{2.85}{X_{tt}^{0.476}}\right)$$

$F = 5Pr_l + 5\ln(1 + 5Pr_l) + 2.5\ln(0.0031Re_l^{0.812})$ $\quad 1125 < Re_l$

$F = 5Pr_l + 5\ln(1 + Pr_l(0.0964Re_l^{0.585} - 1))$ $\quad 50 < Re_l < 1125$

$F = 0.707Pr_l Re_l^{0.5}$ $\quad Re_l < 50$

Eğer $Re_l < 35000$

$$Nu_D = \frac{h_D D}{k_l} = 0.728K\left[\frac{g(\rho_l-\rho_l)\rho_l h'_{fg}D^3}{\mu_l k_l(T_{sat}-T_w)}\right]^{1/4}$$

$$K = \left[1 - \left(\frac{1-x}{x}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{2/3}\right]^{-3/4}$$

Tek fazlı akış için Gnielinski[18] denklemi kullanılacaktır.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1.07+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{.5}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)} \quad 0.5 \le Pr \le 2000 \quad 2300 \le Re \le 510^6$$

Denklemdeki f tek fazlı sürtünme katsayısı olup tek fazlı sürtünme faktörü için **Goudar- Sonnad denklemi (2008)[19]** kullanılacaktır.

$a = \frac{2}{\ln(10)}$

$b = \frac{(\varepsilon/D)}{3.7}$

$d = \frac{ln(10)}{5.02}Re$

$s = bd + \ln\left(\frac{d}{q}\right);$

$q = s^{\left(\frac{s}{s+1}\right)}$

$g = bd + \ln\left(\frac{d}{q}\right)$

$z = \frac{q}{g}$

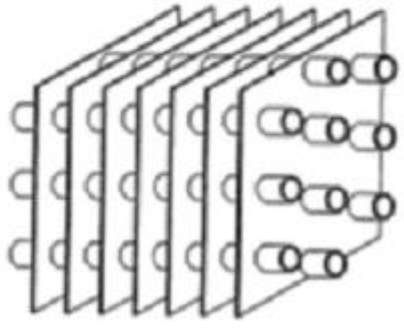
$\delta_{LA} = \frac{g}{g+1}z$

$\delta_{CFA} = \delta_{LA}\left(1 + \frac{z/2}{(g+1)^2+\left(\frac{z}{3}\right)(2g-1)}\right)$

$\frac{1}{\sqrt{f}} = a\left[ln\left(\frac{d}{q}\right) + \delta_{CFA}\right]$

2.5 Kanatlı condenser hava tarafı için için zorlanmış ısı transferi

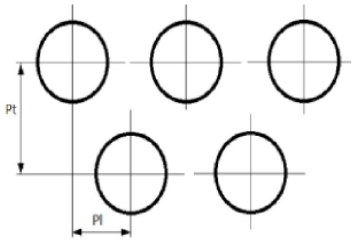
Kanatlı ısı değiştiricilerde kanatlar genellikle şişirme yöntemi dediğimiz yöntemle boruya bağlanırlar. Kanat yüzeyinde kanat levhası basılırken oluşturulmuş bilezik ismini verdiğimiz genişletilmiş bir yüzey alanı bulunur. Boru içinden geçirildikten sonra yüksek iç basınç uygulanarak boru plastik deformasyonla genişletilir ve kanat bileziğiyle boru arasında mekanik temas sağlanır. Daha iyi ısıl veri için kanatla boru sert lehim teknolojileriyle birleştirilebilir ve ısıl direnç minimuma indirilir. Standart mekanik bağlantılı kanat profilleri için aşağıdaki deneysel denklemler verilebilir. [70],[71]



düz kanat

$\eta_0 = \frac{\tanh(mr\phi)}{mr\phi} \quad m = \sqrt{\frac{2h_0}{k_f \delta_f}}$

$\phi = \left[\frac{R_{eq}}{r} - 1\right]\left[\frac{X_L}{X_M} - 0.35 ln\left(\frac{R_{eq}}{r}\right)\right]$



Üçgen dizilim

Üçgen dizilim için:

$\frac{R_{eq}}{r} = 1.27\frac{X_M}{r}\left[\frac{X_L}{X_M} - 0.3\right]^{1/2}$ denklemdeki r boru yarıçapıdır.

$X_L = \sqrt{\left(\frac{P_t}{2}\right)^2 + P_l^2} \qquad X_M = \left(\frac{P_t}{2}\right)$ P_t ve P_l borular arasındaki dik ve yatay mesafedir

Düz kanatlar için:$St = \frac{h}{GC_p}$ stanton sayısı $Re_D = \frac{\rho V D_c}{\mu}$ bu denklemde D_c kanat yüzüğü dış çapı

$D_H = 2R_{eq}$

$j = StPr^{2/3} = \frac{h}{GC_p}Pr^{2/3}$ Colburn denklemi

S kanatlar arası mesafe

δ_f kanat kalınlığı

D_c bilezik dış çapı

Düz kanatlar

Tek sıra (N=1)

$j = StPr^{2/3} = \frac{h}{GC_p}Pr^{2/3} = 0.173Re_D^{-0.346}\left(\frac{P_t}{P_l}\right)^{P1}\left(\frac{D_c}{F_p}\right)^{1.161}\left(\frac{D_h}{F_p}\right)^{1.035}\left(\frac{F_p}{P_t}\right)^{P2}$

$P1 = -0.22\ln(Re_D) + 1.88$

$P2 = 0.106\ln(Re_D)$

İki veya daha fazla sıra ($N \geq 2$)

$j = StPr^{2/3} = \frac{h}{GC_p}Pr^{2/3} = 0.1078Re_D^{P3}N^{P4}\left(\frac{F_p}{D_h}\right)^{P5}\left(\frac{P_t}{F_p}\right)^{1.026}$

$P3 = 0.16\ln\left(N\left(\frac{F_p}{D_c}\right)^{0.42}\right) - 0.349$

$$P3 = \frac{-0.094\left(\frac{P_l}{D_h}\right)^{1.38}}{\ln(Re_D)} - 1.405$$

$$P4 = 1.263ln\left(\frac{Re_D}{N}\right) - 5.97$$

$D_h = \frac{4A_c L}{A_0}$ hidrolik çap

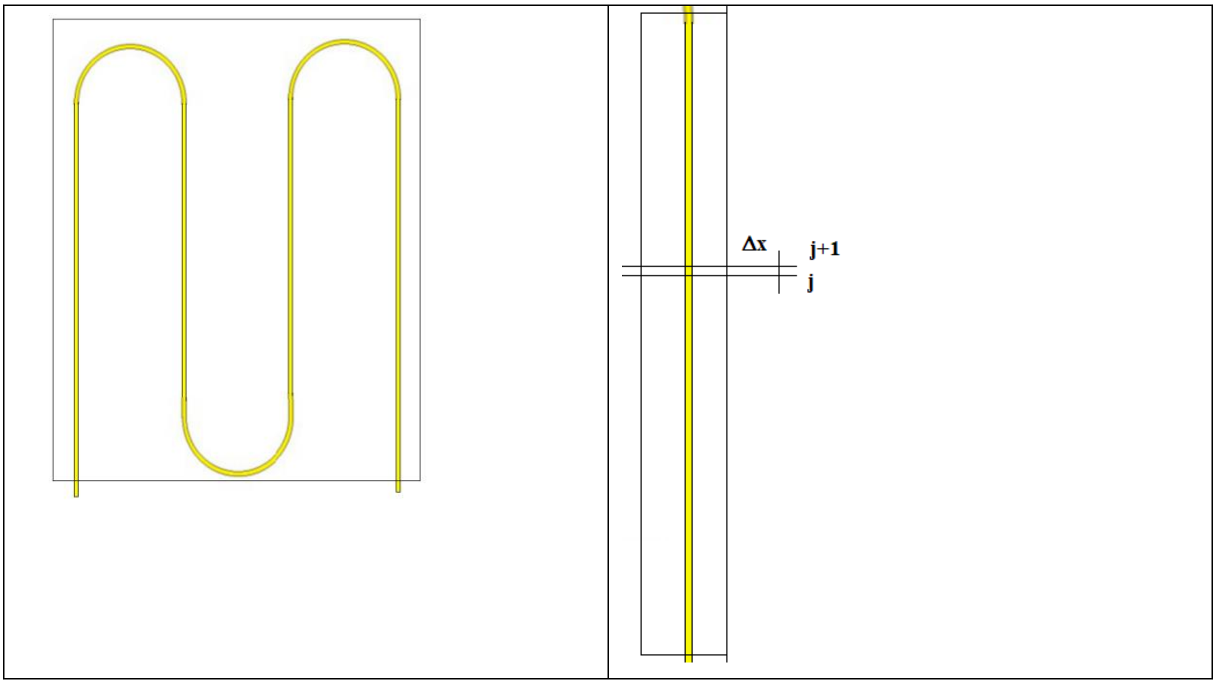
Fanning friction factor:

$$f = 0.0146Re_D^{P6}\left(\frac{P_t}{P_l}\right)^{1.959}\left(\frac{F_p}{D_c}\right)^{P7} N^{0.021}$$

$$P4 = -0.0535 + \frac{0.01166}{ln\left(\frac{P_t}{P_l}\right)} + 0.123\left(\frac{F_p}{D_c}\right)$$

$$P7 = 2.319 - \frac{19.59}{\ln(Re_D)}$$

2.6 Evaporatör sonlu farklar metodu modeli



Evaporatör yatay konumda bulunan düz levha şeklinde modellenmiştir. Modelimiz sonlu farklar olarak oluşturulmuştur. Her sonlu farklar adımı için kanat enerji girdisi $dQ = dA(q_{güneş\ emilen\ enerji} - q_{ışınım\ yayılan\ enerji} + q_{doğal\ taşınım})$ şeklindedir. Her adımdaki soğutkan entalpi değişimi $H_{j+1} = H_j + dH_j = H_j + \frac{dQ}{m_j}$ şeklinde oluşur. Dış havanın nemli hava olduğu ve sıcaklığının değişmediği varsayılmıştır. Entalpi değerleri doyma bölgesi gaz ve sıvı entalpileri ile karşılaştırıldığında hangi faz bölgesinde olduğumuzu buluruz. Eğer $H_{j+1} > H_{sv,j+1}$ ise buharlaştırıcı tek fazlı buhar bölgesindedir, eğer $H_{sl,j+1} \leq H_{j+1} \leq H_{sv,j+1}$ ise yoğuşturucu çift fazlı doyma bölgesindedir. Bu durumda $x = \frac{H_{j+1} - H_{sl,j+1}}{H_{sv,j+1} - H_{sl,j+1}}$ formülü ile doygunluk derecesi hesaplanır. Giriş değerleri genleşme vanası modeli çıktısından alınır. Toplam buharlaştırıcı alanı gerekli ısı değişimini sağlamaya yetecek kadar olmalıdır. Buradan toplam ısı değiştirici dizayn alanı saptanabilir.

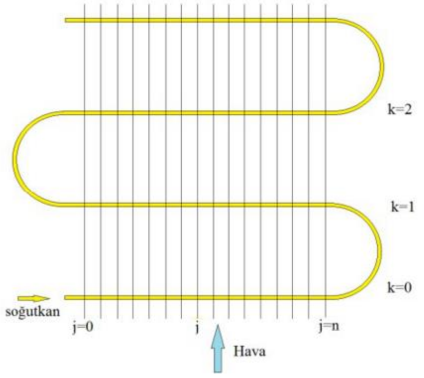
2.7 Yoğuşturucu(Kondenser) sonlu farklar metodu modeli

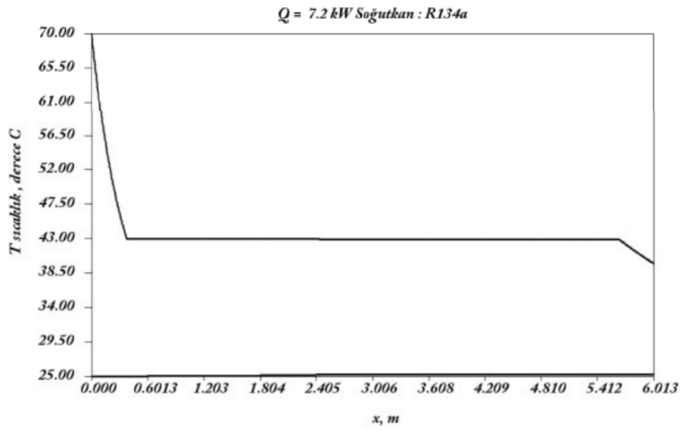
Yoğuşturucu modellenmesinde temel olarak sonlu farklar modeli uygulanmıştır. Yoğuşturucu faz değiştiren bir ısı değiştirici olduğundan sonlu fark adımları olarak entalpi adımları kullanılır. Entalpi değeri yoğuşan buhar ve yoğuşan sıvı entalpileri ile karşılaştırılarak yoğuşmanın başladığı nokta tespit edilir. Faz durumuna göre gaz tek fazlı ısı transferi denklemleri, iki fazlı yoğuşma denklemleri veya bir fazlı sıvı ısı transferi denklemleri kullanılarak sonlu farklar yöntemi ile sıcaklık profilleri, basınç düşümü ve ısı transferi hesapları gerçekleştirilir. Boru içi toplam ısı transfer katsayısı

$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{(A_o + A_f\eta_f)h_0} + \frac{A_i(d_0 - d_i)}{2kA_w} + R_{if} + \frac{A_i}{A_0}R_{of}$ şeklinde verilebilir. Buradan boru içi ısı transferi:

$dq_j = U_{i-j}dA_{i-j}(T_{0-i} - T_{i-j})$

Buradan entalpi $dH_j = \frac{dH_j}{m_j}$ $H_{j+1} = H_j - dH_j$ şeklinde hesaplanabilir. Entalpi değerleri doyma bölgesi gaz ve sıvı entalpileri ile karşılaştırıldığında hangi faz bölgesinde olduğumuzu buluruz. Eğer $H_{j+1} > H_{sv,j+1}$ ise yoğuşturucu tek fazlı buhar bölgesindedir. Eğer $H_{j+1} < H_{sl,j+1}$ ise yoğuşturucu tek fazlı sıvı bölgesindedir. eğer $H_{sl,j+1} \leq H_{j+1} \leq H_{sv,j+1}$ ise yoğuşturucu çift fazlı doyma bölgesindedir. Bu durumda $x = \frac{H_{j+1} - H_{sl,j+1}}{H_{sv,j+1} - H_{sl,j+1}}$ formülü ile doygunluk derecesi hesaplanır.

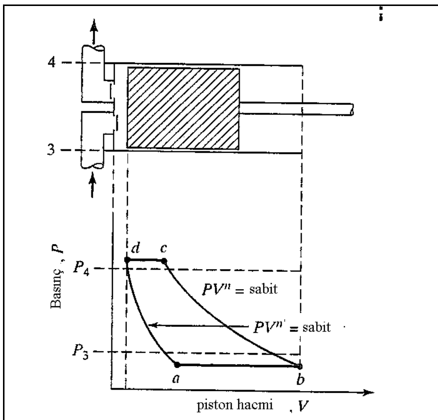
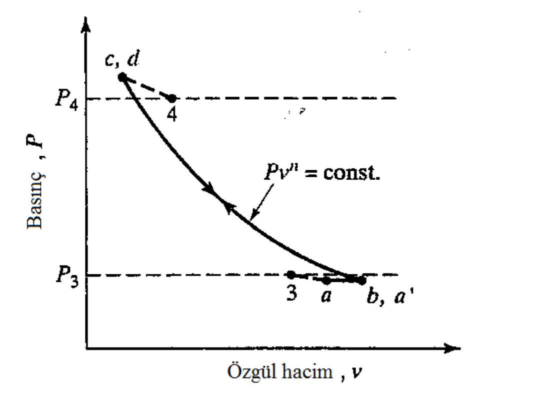




2.8 Kompresör modeli

Kompresörler akışkan basıncı sağlama ekipmanlarıdır. kompresöreler genellikle piston silindir , döner piston, vidalı kompresör ve sarmal kompresör tiplerindedir. Biz bu modelimizde pistonlu bir kompresörü irdeleyeceğiz. Alttaki şekil piston silindirli bir kompresörün sıkışma prosesini göstermektedir. b de c'ye sıkıştırma prosesi için genel politropik prosesin oluştuğunu varsayalım. PV^n=sabit denklemine uyumlu olarak sıkışma gerçekleşecektir. Bu proses için $P_b v_b^n = P_c v_c^n$

Ancak sıkışma sonunda gazın hepsini silindirden atamayız. Az miktadra gaz silindirimizde kalır. Piston tekrar geriye giderken bu gaz genleşir. Bu genleşmenin denklemi $PV^{n'}$=sabit şeklinde gerçekleşir. Bu proses için $P_d v_d^{n'} = P_c v_c^{n'}$ yazılabilir.

	
a) Genel olarak piston silindir prosesi	**b) giriş çıkışkayıpları**

Şekil Pistonlu kompresörün P-V diagramında görünümü

Bir Çevrimde pistondan dışarıya verilen kütlesel debi :

$$m = \frac{V_b}{v_b} - \frac{V_a}{v_{a'}} = \frac{V_b - V_a}{v_b}$$

Bir piston silindirli kompresörde hacmsel verim kompresörün gerçek olarak pompaladığı kütlesel debinin teorik olarak aktarabileceği maksimum kütlesel debiye oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_v = \frac{(V_b - V_a)v_3}{(V_b - V_d)v_b}$$

Aynı zamanda

$$V_b - V_a = (V_b - V_d) - (V_a - V_d)$$

$$V_a = V_d\left(\frac{P_d}{P_a}\right)^{1/n} = V_d\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{1/n}$$

Bir silindir boşlık faktörü tanımlayacak olursak :

$$C = \frac{V_d}{V_b - V_d}$$

$$\frac{V_b - V_a}{V_b - V_d} = 1 + C - C\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{1/n}$$ bu durumda hacimsel verim

$$\eta_v = \left[1 + C - C\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{1/n}\right]\frac{v_3}{v_b}$$

Hacimsel verimin temel tanımından

$$\eta_v = \frac{mv_3}{C.D.}$$ buradaki C.D. piston süpürme hacmidir. M kütlesel debidir. Bu durumda kütlesel debi için

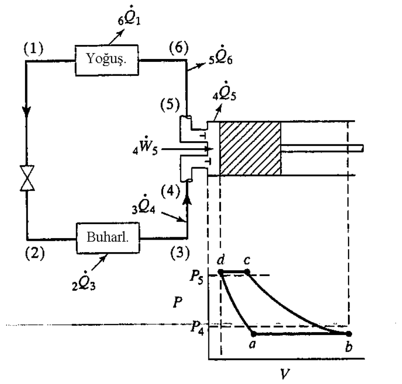
$$m = \left[1 + C - C\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{1/n}\right]\frac{C.D.}{v_b} = \frac{\eta_v C.D.}{v_b}$$

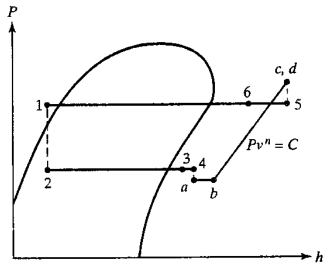
Pistonlu kompresörler için n politropik genleşme katsayısını R22 için 1.12 Amonyak için 1.29 alabiliriz.
Pistonlu kompresörün işi için termodinamikten çıkan genel denklem:

$$w = \frac{n}{n-1}P_b v_b\left[\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{(n-1)/n} - 1\right]$$ bu durumda toplam elektrik kompresör güç girişi için

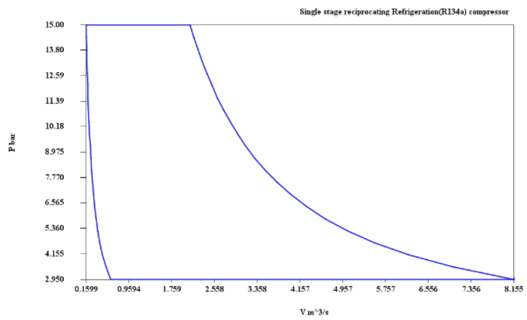
$$W_{elektrik} = \frac{nP_b C.D.}{(n-1)\eta_m \eta_e}\left[1 + C - C\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{1/n}\right]\left[\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{(n-1)/n} - 1\right]$$

Buradaki η_m mekanik verim ve η_e elektrik verimdir.





Alttaki şekilde bir pistonlu R134a kompresörünün Pv diagramındaki davranışı görülmektedir.



Şekil tek kademe soğutkan (R134a) pistonlu kompresörü basınç-hacim diyagramı

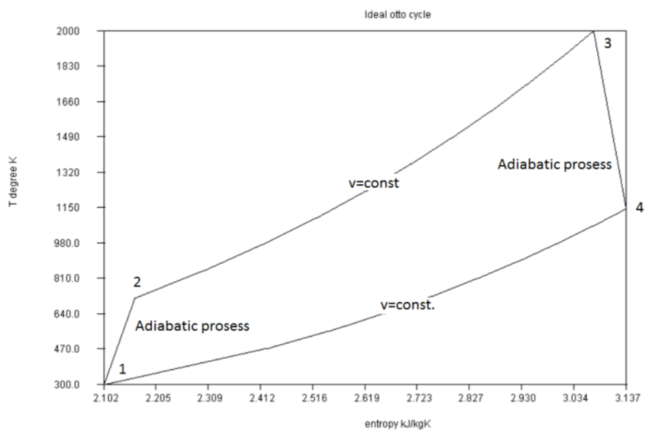
2.9 Genleşme vanası modeli

Genleşme vanasının giriş ve çıkışında akışkan entalpisi sabit kabul edilip, vananın modellenmesinde James ve James (1987)'de belirtilen orifis denklemi kullanılmıştır. Orifis denklemini $\dot{m} = 0.0683x\sqrt{\left(P_{kond} - P_{evap}\right)}$ Bu denklemde x valf iğnesinin açıklık miktarını temsil etmektedir.

2.10İçten yanmalı motor modeli

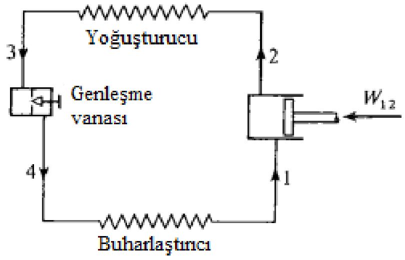
Bir ilk yaklaşım olarak burada temel bir içten yanmalı gaz motoru simulasyonu yapılacaktır. Teorik çevrim verimi: $\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_H}{Q_L} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_4} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$

$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n1-1}$ $\left(\frac{T_3}{T_4}\right) = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{n2-1}$ buradaki n1 ve n2 polytropik genleşme ve sıkıştırma katsayılarıdır.



2.11 Isı pompası modellenmesi

Isı pompası çevrimi olarak standart soğutma çevrimi göz önüne alınmıştır. Standart soğutma çevriminin şematik diyagramı Şekil 2.9.1 de verilmiştir.



Standart soğutma çevrimi

Standart soğutma çevrimi için temel denklemlerimiz:

$W_{kompresör} = m(h_2 - h_1)$

$W_{isentropik\ kompresör} = m(h_{2i} - h_1)$

$\eta_{\ sentropik} = \frac{W_{isentropik\ kompresör}}{W_{kompresör}} = m(h_{2i} - h_1)$

$s_{2i} = s_1$

$Q_{yoğuşturucu} = m(h_2 - h_3)$

Genleşme vanası: $h_3 = h_4 + \Delta h$

Δh : genleşme vanasında ısı transferinden dolayı oluşan entalpi farkı

$Q_{buharlaştırıcı} = m(h_1 - h_4)$

$W_{net} = W_{kompresör} = Q_{yoğuşturucu} - Q_{buharlaştırıcı}$

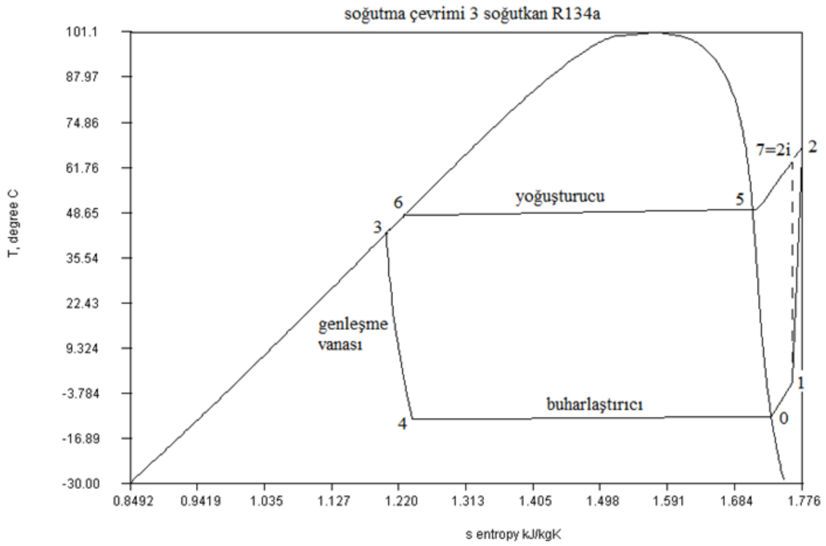
Etkinlik katsayısı buharlaştırıcı

$\boldsymbol{COP = \frac{Q_{buharlaştırıcı}}{W_{kompresör}}}$

Etkinlik katsayısı yoğuşturucu

$COP = \frac{Q Q_{yoğuşturucu}}{W_{kompresör}}$

Denklemler bilgisayar ortamında programlanmıştır. Programın tipik bir çıktısı alttaki de görülmektedir.



Şekil ısı pompası, akışkan R134a

3. Bilgisayar modelleri:

Çözülmesi gereken denklemlerden de görüldüğü gibi bilgisayar modelleri çeşitli programların bir araya gelmesi ile oluşmuştur. Bu programların temel olanları aşağıdaki tabloda listelenmiştir:

Solar_boosted_heat_pump	Güneş destekli ısı pompası simulasyonu, güneşten gelen enerjiler, levha tarafından yutulan enerjiler, yayılan enerji..
solar	Güneş enerjisinin çeşitli özellikleri
humid_air_IAPWS	Nemli havanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri
refrigerant	Soğutkanların termodinamik özellikleri
ref_CS3	Soğutkanların doyma termodinamik ve termofiziksel özellikleri
kanatliisidegistirici5	düz sürekli kanatlı ısı değiştiricisi (kondenser)
ref_cycle3	Isı pompası-soğutma çevrimi
ref_cycle3test	Isı pompası-soğutma çevrimi çıktı programı

İlgilenen araştırıcılarla tüm modeller ve termodinamik/termofiziksel hesaplama alt yapısı paylaşılabilir.

4. Sonuç ve tartışma

Bu çalışmada güneş enerjisi destekli bir ısı pompasının modellemesi ve bu modelled gereken temel parametrelerin hesap yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada güneş enerjisini çok basit levha tipi yatay konumda ve çıplak (cam veya izolasyon tabakası mevcut değildir) buharlaştırıcılar kullanılmaktadır. Buharlaştırıcıların çıplak olmasının gayesi çevreden de doğal taşınım yoluyla enerji aktarabilmesinin sağlanmasıdır. Modelin temel gayesi imal edilecek bir prototip için temel parametrelerin saptanmasına yardımcı olmasıdır. Proje daha başlangıç aşamasındadır. Bu tür sistemler yüksek enerji verimleriyle ve ek olarak gaz motorlarında oluşan ısının da ek enerji olarak kullanılabilmesi olanaklarıyla, güreceli az güneş alanine sahip yerlerde etkin bir alternative oluşturmaktadır. Dünyada yaygın olarak kullanılan bu tür ısı pompalarının türkiyede bir uygulaması mevcut değildir.

5. Referanslar:

1. H. Tabor, Solar Collectors, Selective Surfaces, and Heat Engines, Proc Natl Acad Sci USA 1961 Aug; 47(8) PMCID: PMC223132, 1271-1278
2. John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Second Eddition, 1991, Willey-Interscience ISBN: 0-471-51056-4
3. Bülent Aksoy, Solar Radiation over Turkey and its analysis, International Journal of Remote Sensing, 2011, 1-12
4. Ozan Şenkal,Tuncay Kuleli, Estimation of solar radiation over Turkey using artificial neural network and satellite data
5. M. Turhan ÇOBAN, Dairesel, düz sürekli kanatlı yoğuşturucuların sonlu farklar yöntemiyle modellenmesi, ULIBTK’15 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 02-5 eylül 2015, Balıkesir, Bildiriler kitabı, Editörler: Okan KON, Doç. Dr. Hüseyin BULGURCU
6. M. Turhan ÇOBAN (2013). Sürekli kanatlı zorlanmış taşınımlı hava su ısı değiştiricinin modellenmesi. 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi-612. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2480280)

7. Halil ATALAY,M. Turhan ÇOBAN (2011). soğutkan karışımlarının termodinamik özelliklerinin peng robinson stryjek vera gerçek gaz denklemi kullanılarak modellenmesi. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 991-999. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2481066)
8. ÇOBAN MUSTAFA TURHAN,turgut oğuz emrah (2011). soğutkanlar için çeşitli çift fazlı akış basınç düşümü denklemlerinin modellenmesi ve karşılaştırılması. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 1003-1022. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2480481)
9. Mustafa Turhan Çoban, Thermodynamic and thermophysical properties of humid air by using iapws formulations, 6^{th} Int. Conf.; Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials(THERMAM),22-24 sept 2019, Çeşme, İzmir, Turkey
10. J.R. Cooper, R. B. Dooley, The International Association for the Properties of Water and Steam, Guideline on an Equation of State for Humid Air in Contact with SeaWater and Ice, Consistent with the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamic Properties of SeaWater
11. The International Association for the Properties of Water and Steam, Revised Relase on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, Prague, Check Republic 2018, IAPWS R6-95(2018)
12. K. Kadoya, N. Matsunaga, and A. Nagashima, Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in the Gaseous Phase, Journal of Physical and Chemical Reference Data 14, 947 (1985)
13. E. W. Lemmon & R. T. Javobsen, Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air, International Journal of Thermophysics, Vol. 25, No. 1, January 2004
14. The International Association for the Properties of Water and Steam, Revised Relase on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Lucerne, Switzerland, August 2007, IAPWS R7(2012)
15. **Turgut, Oguz Emrah, Asker, Mustafa, Coban, Mustafa Turhan,** Saturated Flow Boiling Heat Transfer Correlation for Small Channels Based on R134a Experimental Data, Arab J Sci Eng (2016) 41:1921–1939 DOI 10.1007/s13369-016-2038-1
16. **Turgut, Oguz Emrah, Coban, Mustafa Turhan, Asker, Mustafa,** Comparison of Flow Boiling pressure drop correlations for smooth macrotubes, Heat transfer engineering37:6,487-506
17. **Traviss, D.P., Rohsenow, W.M. and Baron A.B.,** Forced convection condensation inside tubes:a heat transfer equation for condenser design, ASHRAE Transactions, 79, part1, 157-165 (1973)
18. **Gnielinski**, New Denklemis for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, V., Int. Chem. Eng. , 16, 359-367, 1976
19. **Goudar, C.T. and Sonnad, J.R. ,** "Comparison of the iterative approximations of the Colebrook-White equation", Hydrocarbon Processing, August 2008, pp 79-83