

# Bina Enerji Tüketiminin Isıl Modellenmesi

## İbrahim KOÇ

Yrd. Doç. Dr.  
İstanbul Gelişim Üniversitesi  
Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu  
İstanbul  
ibkoc@gelisim.edu.tr

## Ersin SAYAR

Öğr. Gör. Dr.  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Makine Fakültesi  
İstanbul  
ersin.sayar@itu.edu.tr

## İ. Cem PARMAKSIZOĞLU

Prof. Dr.  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Makine Fakültesi  
İstanbul  
parmaksizo@itu.edu.tr

## ÖZ

Bu çalışmada, ısı kaybı ve kazancının sadece pencere ve dış duvardan olduğu varsayılan bir odanın ısı modeli çıkartılmıştır. Pencere ve dış duvarların paralel bağlı levhalar olduğu kabul edilmiş ve bir boyutlu zamana bağlı ısı iletimi denklemleri sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Modelin doğruluğunu ispatlamak ve uygulanmasını göstermek amacıyla seçilen çeşitli uygulama problemleri sürekli rejim problemlerinin analitik çözümleri ile karşılaştırılarak ve gittikçe karmaşık hale getirilerek çözülmüştür. Çalışmanın amacı binaların TS EN ISO 13790 Standardı'na göre yapılan uygulama çözümlerini karşılaştıracak basit bir dinamik ısı kaybı modeli geliştirmek ve daha karmaşık uygulamalar için daha esnek bir ısı model geliştirmektir.

## Anahtar Kelimeler

Bina Enerji Tüketimi, Isıl Modelleme.

# Thermal Model of Building Energy Consumption

## ABSTRACT

In this study, thermal model of a room is developed where heat loss and gain occurs only through the exterior walls or windows. Windows and exterior walls are assumed as planar surfaces. One dimensional heat conduction equations for parallel connected one dimensional planar surfaces are presented as a dynamic model and the equations are solved with the finite difference method. Application oriented problems are utilized to validate the proposed method and to illustrate the application of the aforementioned method, where a gradually increasing complexity is considered. Aim of this study is to model a simple dynamic heat loss model in order to compare the results of the application examples using buildings standard, TS EN ISO 13790. Hence, the aim is also to develop a flexible thermal model for more complex applications of the energy performance of buildings standard.

## Keywords

Building Energy Consumption, Thermal Modeling.

Geliş Tarihi : 23.01.2017

Kabul Tarihi : 10.03.2017

Koç, İ., Sayar, E., Parmaksızoğlu, İ. C., Bina Enerji Tüketiminin Isıl Modellenmesi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, sf. 1987-1999, Nisan 2017.

## 1. GİRİŞ

Enerji tasarrufunun ve doğru kullanılmasının özellikle enerji kaynakları yetersiz ülkeler için önemi açıktır. Enerji tüketiminin önemli bir kısmı binalarda meydana gelmektedir. Bu konuda tüm dünyada sayısız çalışma ve ülkemizde de geçerli olan TS EN ISO 13790 Standardı'na göre enerji tüketimini hesaplayan bir yazılım mevcuttur. Bu standarttaki ısı model Şekil 1'de verilmiştir.

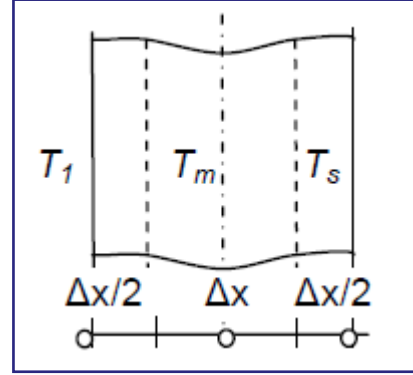
Problem, enerji tüketimi hesabının çok sayıda değişkene bağlı olması, dış sıcaklığın ve güneş dâhil ısı kazançlarının zamanla değişmesi ve uyulması gereken kararlılık kriterleri nedeniyle karmaşıktır. Duvarda zamana bağlı tek boyutlu ısı geçişi;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

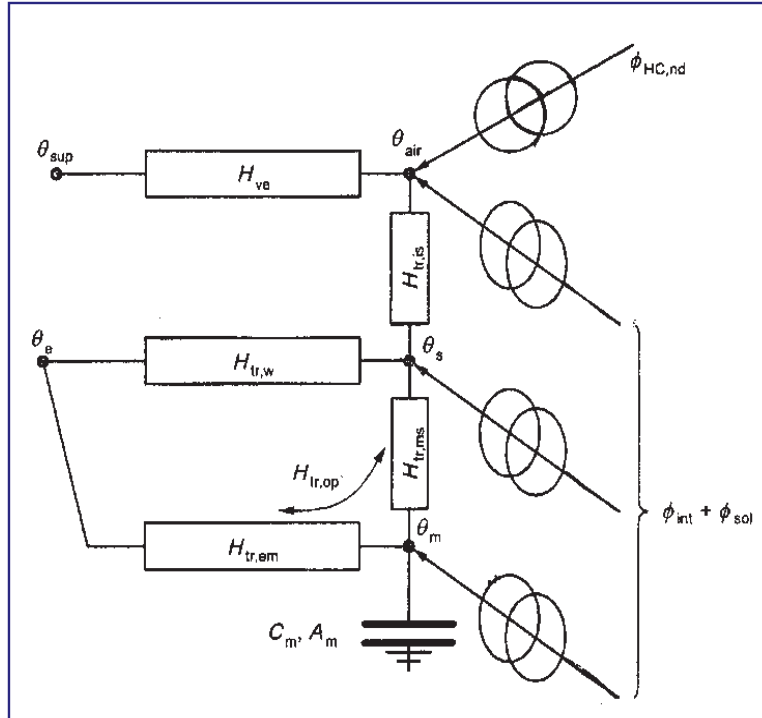
İç nokta,  $T_m^{t+1}$  bulmak için  $\Delta x$  elemanı göz önüne alınarak yukarıdaki denklem ayrılaştırılırsa;

$$\frac{\rho \cdot c \cdot (T_m^{t+1} - T_m^t)}{\Delta t} = k \frac{(T_1^t - 2 \cdot T_m^t + T_s^t)}{\Delta x^2} \quad (2)$$

olur, Şekil 2.



Şekil 2. Duvar tek boyutlu ağ ve düğüm noktaları



Şekil 1. TS EN ISO 13790 basit saatlik metod, beş direnç, bir kapasite (5RIC) modeli, burada,  $T_e$  dış,  $T_s$  duvar ve cam iç yüzey,  $T_{air}$  iç ortam,  $T_m$  duvar,  $T_{sup}$  havalandırma, taze hava sıcaklığı,  $H_{tr,m}$  duvar,  $H_{tr,w}$  cam,  $H_{tr,i}$  iç ortam taşınım direnci,  $H_{ve}$  havalandırma katsayısı,  $C_m, A_m$  duvarın ısı kapasitesi,  $\phi_{int}$  iç,  $\phi_{sol}$  güneş ısı kazançları,  $\phi_{HC,nd}$  ısıtma veya soğutma ısı gücü (ayar sıcaklığı noktasına göre) anlamındadır.

Not: EN standartlarına göre sıcaklık  $\theta$ , ısı  $\phi$  ile gösterilmiştir.

Duvar eksenindeki düğüm noktası;

$$T_m^{t+1} = Fo \cdot (T_1^t + T_m^t) + T_m^t (1 - 2Fo) \quad (3)$$

Sınır noktaları; iç yüzey,  $\Delta x/2$  elemanı için enerji korunumu yazılırsa;

$$\frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot (T_s^{t+1} - T_s^t)}{2\Delta t} = \frac{k}{\Delta x} (T_m^t - T_s^t) + h_i \cdot (T_i^t - T_s^t)$$

$$T_s^{t+1} = 2Fo \cdot (T_m^t + Bi_i \cdot T_i^t) + (1 - 2Fo - 2Bi_i \cdot Fo) \cdot T_s^t \quad (4)$$

Dış yüzey,  $\Delta x/2$  elemanı için enerji korunumu yazılırsa;

$$T_1^{t+1} = 2Fo \cdot (T_m^t + Bi_d \cdot T_d^t) + (1 - 2Fo - 2Bi_d \cdot Fo) \cdot T_1^t \quad (5)$$

elde edilir, Şekil 2. Burada Fourier sayısı  $Fo = \alpha \cdot \Delta t / L^2$  ve duvar tek bir malzemeden yapıldığı varsayımı ve ısı iletim katsayısı  $k$  için iç yüzde Biot sayısı  $Bi_i = h_i \Delta x / k$ , dış yüzde  $Bi_d = h_d \Delta x / k$ 'dir ( $2h\Delta t / \rho c \Delta x = 2BiFo$ ).

Kararlılık kriteri olarak, iç noktada Denk. 3'te  $T_m$  ve yüzeylerde  $T_s^t$  ve  $T_1^{t+1}$ 'nin katsayıları 0 veya 0'dan büyük olmalıdır. Buna göre  $\Delta t$  seçiminde,

$$Fo \leq 1/2, \text{ yüzeylerde } Fo(1+Bi) \leq 1/2 \quad (6)$$

kriterlerini sağlamalıdır.  $Bi > 0$  olduğundan yüzeydeki kriter alınmalıdır.

## 2. ISIL MODEL

Bir örnek oda alınarak odanın dış duvarı için sürekli ve geçici rejimde çeşitli modeller oluşturulmuştur. Bu çalışmada odanın dış duvarının iç yüzeyindeki ısı taşınım direnci  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ , dış yüzeyindeki ısı taşınım direnci  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ , ısı iletim katsayısı (tek bir malzemeden yapıldığı varsayımı ile)  $1 \text{ W/mK}$ , yoğunluğu  $2000 \text{ kg/m}^3$ , özgül ısısı  $1000 \text{ J/kgK}$  alınmıştır,

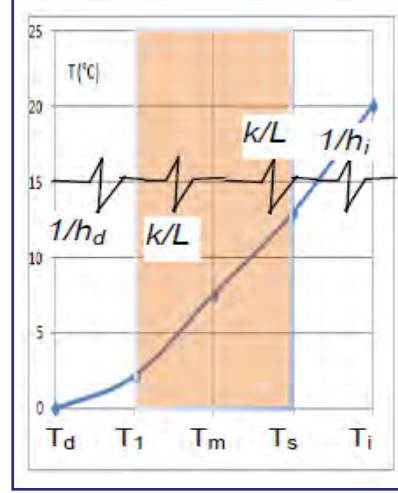
### 1. Dış duvar, sürekli rejim

Sürekli rejimde dış ve iç sıcaklıklar,  $0$  ve  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  için  $20 \text{ cm}$  kalınlıkta duvarın yüzey ve orta nokta sıcaklıkları aşağıdaki gibi bulunur, Şekil 3. Duvar orta nokta sıcaklığını bulmak için duvarın ortasına göre iletim dirençleri  $R_{d1} = R_{d2} = 0,1/1 = 0,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ,  $R_{\text{toplam}} = 0,37 \text{ m}^2\text{K/W}$  olup geçen ısı akısı  $q'' = 54 \text{ W/m}^2$ 'dir.

Sıcaklık dağılımı Tablo 1 ve Şekil 3'te verilmiş olup iki gün  $48 \text{ h}$  için enerji tüketimi  $Q = 54 \cdot 110 \cdot 48 = 285405 \text{ Wh}$ 'dir.

Tablo 1. Sürekli Rejim

$T_d$ $^\circ\text{C}$	$T_i$ $^\circ\text{C}$	$T_m$ $^\circ\text{C}$	$T_s$ $^\circ\text{C}$	$T_1$ $^\circ\text{C}$	$R_{\text{toplam}}$ ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )	$q''$ ( $\text{W/m}^2$ )
0	2,16	7,57	12,97	20	0,370	54



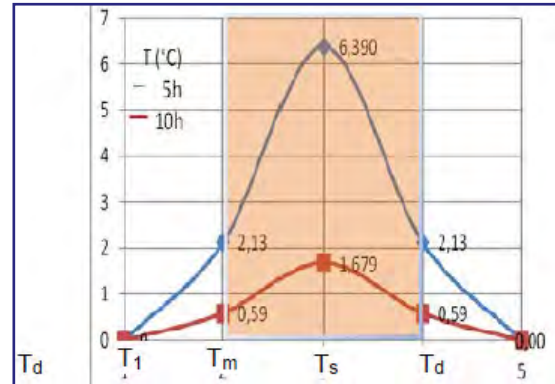
Şekil 3. Dış duvar için sürekli rejim sıcaklık dağılımı

### 2. Dış duvar, geçici rejim

Özdeş duvarın her noktasındaki sıcaklık  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  iken aniden her iki taraftaki dış ortam sıcaklıkları ve ısı taşınım dirençleri  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  olsun.

Tablo 2. Geçici Rejim, Simetrik Sınır Şartı

t	$T_d$	$T_1$	$T_m$	$T_s$	$T_i$	Fo	Z	T
h	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$			$^\circ\text{C}$
5	0	2,13	6,390	2,13	0	0,9	1,16	6,28
10	0	0,59	1,679	0,59	0,00	1,8	2,32	1,97
30	0	0,00	0,008	0,00	0,00			



Şekil 4. Dış duvar geçici rejim sıcaklık dağılımı

t= 30 h sonunda tüm duvar sıcaklığı ortam sıcaklığına inmektedir. İkinci bir yol olarak,  $Fo > 0,2$  için seri çözümün ilk terimi;

$$\frac{T_{\text{eksen}} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = C_1 \cdot \exp(-\xi^2 \cdot Fo)$$

alınarak,  $Bi = 2,5$  için ısı geçişi kitaplarındaki tablolardan [2]  $C_1 = 1,1943$ ,  $\xi = 1,1347$  bulunur. Elde edilen zamana bağlı çözüm Şekil 4 ve Tablo 2'nin son sütununda verilmiştir.

### 3. Dış duvar, geçici rejim

Özdeş duvar  $t = 0$  anında tüm duvar  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  sıcaklıkta iken dış ortam sıcaklığı aniden  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'a düşsün, iç ve dış taraftaki ortam sıcaklıkları ve ısı taşınım dirençleri  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  ve  $0,13$ ,  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  olsun. Duvarın zamana bağlı sıcaklık dağılımını ve sürekli rejime erişene kadarki enerji tüketiminin bulunması istensin. Duvardaki ısı geçişi tek boyutlu kabul edilerek, zamana bağlı tek boyutlu ısı iletim denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak Denk 3, 4 ve 5 yardımıyla, yüzeylerdeki en küçük kararlılık kriteri göz önüne alınarak;

$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 1000 \text{ J/kgK}$  olsun

$\Delta t = 1$ ,  $h = 3600 \text{ s}$  için

$\alpha = k/p$ ,  $c = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Fo = \alpha \Delta t / L^2 = 0,180$ ,

$Bi_{\text{dış}} = h_{\text{dış}} L/k = 2,500$ ,  $Bi_{\text{iç}} = h_{\text{iç}} L/k = 0,769$

bulunur. Dış, iç ortam ve duvar  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  iken aniden dış ortam sıcaklığı  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  düşüp sabit kalması halinde Denk. 3-7'nin birbirlerine bağlı olarak eş zamanlı çözümü ile, kararlılık kriterleri Denk. 6'dan  $Fo(1+Bi_{\text{dış}}) = 0,630$  ve  $Fo(1+Bi_{\text{iç}}) = 0,318$  için, 48 h'te, sürekli rejim (Örnek 1) şartlarına erişilir, Tablo 3. Bu süredeki 2 gün enerji tüketimi saatlik enerji kayıpları toplanarak  $Q = 2207 \text{ Wh/(m}^2 \text{ 2 gün) }$  bulunur.

**Tablo 3. Geçici Rejim, Ağır Duvar**

$ T_d $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_1 $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_m $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_s $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_i $ $ ^\circ\text{C} $	t h
0	20	20	20	20	t= 0 Başlangıç sınır şartı
0	2,90	9,81	14,68	20	t= 10 h
0	2,29	7,94	13,26	20	t= 20 h
0	2,18	7,63	13,02	20	t= 30 h
0	2,16	7,57	12,97	20	t= 48 h, 2 gün, $ q'' = 54 \text{ W/m}^2 $ Sürekli rejim

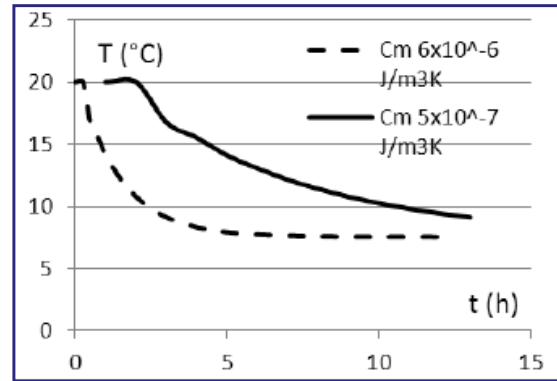
### 4. Dış duvar(hafif duvar), geçici rejim

Aynı dış duvar,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 500 \text{ J/kgK}$  olup farklı ısı kapasitede olsun,  $\Delta t = 0,25 \text{ h} = 900 \text{ s}$  için  $\alpha = k/p$ ,  $c = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Fo = \alpha \Delta t / L^2 = 0,180$ ,  $Bi_{\text{dış}} = h_{\text{dış}} L/k = 2,500$ ,  $Bi_{\text{iç}} = h_{\text{iç}} L/k = 0,769$  bulunur. Dış, iç ortam ve duvar  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  iken aniden dış ortam sıcaklığı  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  inmesi halinde, Denk. 3-5'in birbirlerine bağlı olarak eş zamanlı çözümü ile;

**Tablo 4. Geçici Rejim, Hafif Duvar**

$ T_d $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_1 $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_m $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_s $ $ ^\circ\text{C} $	$ T_i $ $ ^\circ\text{C} $	
20	20	20	20	20	t= 0 Başlangıç sınır şartı
0	2,17	7,58	12,98	20,00	t= 10 h
0	2,16	7,57	12,97	20,00	t= 12 h 1/2 gün, $ q'' = 54 \text{ W/m}^2 $ Sürekli rejim

saatlik enerji kayıpları toplanarak 2 gün, 48 h için  $Q = 2517 \text{ Wh/m}$  bulunur. Duvarın ısı kapasitelerine göre karşılaştırma yapıldığında,  $\alpha$  ısı yayılım katsayısı artarken (hafif duvar) çok daha çabuk 2 gün yerine yarım günde rejime girdiği görülür, Şekil 5.



**Şekil 5. Dış duvarın ısı kapasitesinin etkisi**

### 5. Dış duvar, geçici rejim, değişken dış sıcaklık (periyodik sınır şartı)

Gerçekte, binanın bulunduğu iklim şartlarına göre dış sıcaklığın değişiminin de göz önüne alınması gerekir. Dış sıcaklıkların saatlik değişiminin bulunabileceği kaynaklar mevcuttur.

Duvar:  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 1000 \text{ J/kgK}$  olsun,  $\Delta t = 1$   $h = 3600 \text{ s}$  için

$\alpha = k/p$ ,  $c = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Fo = \alpha \Delta t / L^2 = 0,180$ ,

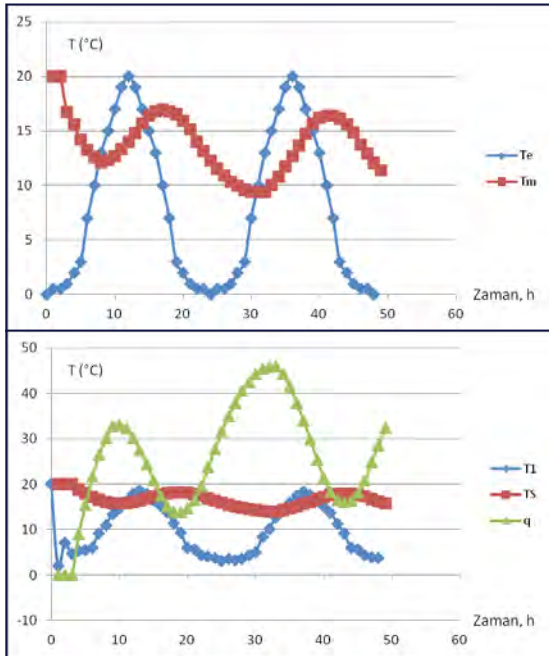
$$Bi_{dış} = h_{dış} L/k = 2,500, Bi_{iç} = h_{iç} L/k = 0,769$$

İki gün için aynı sıcaklık dağılımı alınarak bulunan duvar orta nokta sıcaklığının değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

**Tablo 5. 48 saatlik sürede dış ortam sıcaklığının değişken olması halinde**

t h	T <sub>d</sub> °C	T <sub>1</sub> °C	T <sub>m</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	q W
0	0	20	20	20	20	0
1	0,50	2,00	20,00	20,00	20	0
12	20,00	17,91	14,80	16,42	20	3027
24	0	3,81	11,50	15,89	20	3474
36	20,00	17,54	13,69	15,58	20	3738
48	0	3,77	11,37	15,80	20	3557
					Q(kWh)	138780

Not: 24 h-48 h arası verilmemiş, 48 h sonundaki sıcaklık dağılımı ve enerji kaybı verilmiştir, Tablo 5 ve Şekil 6



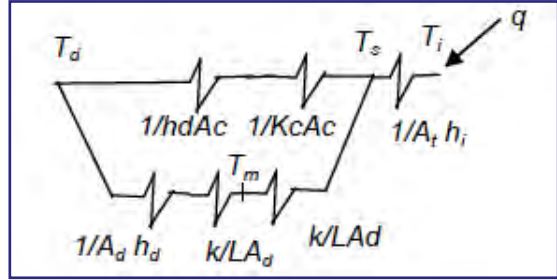
**Şekil 6. T<sub>d</sub> dış sıcaklığın değişimine karşılık gelen duvar (a) orta noktasının (b) yüzey sıcaklıklarının ve ısı geçişinin zamana bağlı değişimi**

## 6. Dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar, sürekli rejim

Isı kaybının bir kısmı pencerelerden olacağından ısıl modelde pencerelerin de göz önüne alınması gerekir. Binanın çift camlı pencerelerinin toplam ısı geçiş katsayısı K<sub>c</sub> = 2,8 W/m<sup>2</sup>K, toplam cam ala-

nı A<sub>c</sub> = 10 m<sup>2</sup>, duvar alanı A<sub>d</sub> = 100 m<sup>2</sup>, toplam dış yüzey alanı A<sub>t</sub> = 110 m<sup>2</sup> olsun.

Pencere ve duvardan geçen ısı geçişi paralel karma duvar olarak, aşağıdaki elektrik benzeşim modeli ile ele alınabilir, Şekil 7, Burada duvar ve cam iç yüzey sıcaklığı standarttaki modele benzer olsun diye aynı alınmıştır, kolaylıkla cam ve duvar iç yüzey sıcaklıkları farklı alınabilir.



**Şekil 7. Pencere ve duvardan oluşan karma paralel duvarın elektrik benzeşimi**

$$R_{duvar+cam} : \frac{1}{R_{d+c}} = \frac{A_d}{(1/h_d)+2(L/k)} + \frac{A_c}{R_c}$$

Toplam ısı geçiş katsayısı K<sub>c</sub> = 2,8 W/m<sup>2</sup>K olan çift cam seçilirse (1/K<sub>c</sub> = 1/2,8+1/h<sub>i</sub>) iç yüzeye kadar ki direnç R<sub>c</sub>=0,22 m<sup>2</sup>K/W ve duvar direnci R<sub>d+c</sub> = 0,00216 K/W olur.

$$R_{duvar+cam(es)} : R_{toplam} = R_{d+c} + 1/(A_i h_i) \text{ tanımlanır}$$

$$R_{toplam} = 0,00335 \text{ K/W ve } q = (20-0)/R_{es} = 5978 \text{ W}$$

elde edilir.

**Tablo 6. Karma Paralel Duvar Sürekli Rejim**

T <sub>d</sub> °C	T <sub>1</sub> °C	T <sub>m</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	R <sub>toplam</sub> (K/W)	q(W)
0	2,16	7,55	12,94	20	0,00335	5978

48 h için Q= 5978·48= 286944 Wh bulunur, Tablo 6.

## 7. Dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar: geçici rejim

Karma duvar t= 0 anında 20 °C sıcaklıkta iken dış ortam sıcaklığı aniden 0 °C'a düşsün, Denk. 4'e pencere ısı kaybı eklenerek;

$$T_s^{t+1} = (A_t/A_d)2Fo \cdot Bi_i(T_i - T_s^t) +$$

$$2Fo \cdot (T_i - T_s^t) + (A_c/A_d) \cdot 2Fo \cdot Bi_c(T_d - T_s^t)$$

duvarın zamana bağlı sıcaklık dağılımı ve sürekli

rejime erişene kadarki enerji tüketimi Tablo 7'de verilmiştir.

**Tablo 7. Karma Paralel Duvar Geçici Rejim**

t h	T <sub>d</sub> °C	T <sub>1</sub> °C	T <sub>m</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	q W	Q Wh
0	0	20	20	20	20		
1	0	2,00	20,00	20,00	20,00		
10	0	2,84	9,62	14,40	20,00	4735	
20	0	2,26	7,86	13,16	20,00	5792	
30	0	2,17	7,59	12,97	20,00	5950	
Sürekli rejim	39	0	2,16	7,55	12,94	20,00	194406

48 h'teki ısısal enerji kaybı:

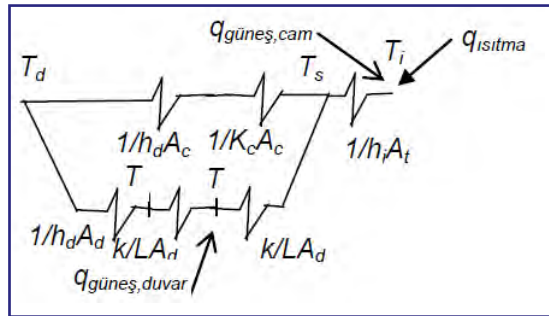
194406 Wh + 9 h·5973 W = 248159 Wh, 2. dış duvar geçici rejim örneğinde Q = 2207 Wh/m bulunmuştu.

$$Q = 2207 \text{ Wh/m}^2 \cdot 110 \text{ m}^2 = 242770 \text{ Wh}$$

ise 10 m<sup>2</sup> cam nedeniyle oluşan ısısal enerji farkı fazlası 5390 Wh olur. (Not: K<sub>d</sub>=2,7 W/m<sup>2</sup>K, K<sub>c</sub>= 2,8 W/m<sup>2</sup>K, Bi<sub>c</sub>=Δx/R<sub>c</sub>k)

**8. Eşit güneş ışınımı akısı gelen dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar için sürekli rejim**

Camlı dış duvara toplam 2200 W, q''=20 W/m<sup>2</sup>, q<sub>G,duvar</sub> = 2000 W, q<sub>G,cam</sub> = 200 W sabit güneş ışınımı



**Şekil 8. Pencere ve duvardan oluşan karma paralel duvarın elektrik benzeşimi**

$$\frac{T_s - T_d}{R_p/A_c} + \frac{T_s - T_m}{L/kA_d} = \frac{T_i - T_s}{R_{ti}/A_t}$$

$$\frac{T_m - T_d}{(1/h_d + 1/k)A_d} = \frac{T_s - T_m}{R_{ti}/A_t} + \frac{q_d}{A_d}$$

iki bilinmeyenli denklemden duvar T<sub>m</sub> ve iç yüzey T<sub>s</sub> sıcaklıkları bulunursa, Tablo 8, sürekli rejimde;

**Tablo 8. Güneş Işınımı Gelen Karma Paralel Duvar, Sürekli Rejim**

T <sub>d</sub> °C	T <sub>1</sub> °C	T <sub>m</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	q W	q <sub>c</sub> W	q <sub>d</sub> W
0	2,64	9,23	13,83	20	5023	629	4395

48 h'de toplam enerji kaybı 5023·48 = 24112 Wh olur.

**9. Eşit güneş ışınımı akısı gelen dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar için geçici rejim**

Tüm duvar 20 °C iken dış sıcaklık aniden 0 °C'ye düşmesi ve T<sub>m</sub> noktasına q''(W/m<sub>2</sub>) güneş ışınımı gelmesi halinde iç nokta T<sub>m</sub> sıcaklığı Denk. 3 yerine;

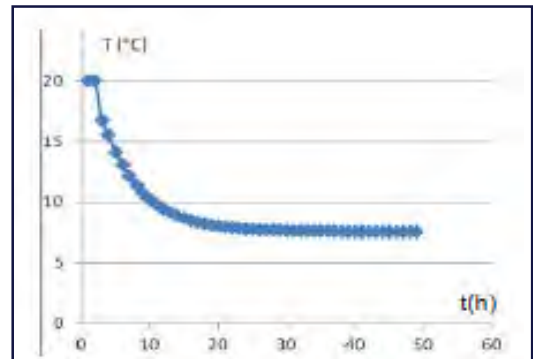
$$T_m^{t+1} = Fo \cdot (T_1 - T_s) + T_m^t (1 - 2Fo) + q'' \Delta t / (\rho \cdot c \Delta x) \cdot (T_i - T_s) + (A_c/A_d) \cdot 2Fo \cdot Bi_c (T_d - T_s) \quad (7)$$

eşitliği ve yüzey sıcaklıkları (4) ve (5) yardımıyla aşağıdaki sıcaklıklar hesaplanır, Tablo 9.

**Tablo 9. Güneş Işınımı Gelen Karma Paralel Duvar, Geçici Rejim Duvara Gelen Güneş Işınımı q<sub>G,duvar</sub> = 2000 W**

t h	T <sub>d</sub> °C	T <sub>1</sub> °C	T <sub>m</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	q W	Q Wh
0	0	20	20	20	20		
1	0	2,00	20,36	20,00	20,00	0	
12	0	3,05	10,49	14,72	20,00	4271	
24	0	2,68	9,36	13,92	20,00	4946	
36	0	2,64	9,25	13,84	20,00	5015	
39	0	2,64	9,24	13,83	20,00	5019	Sürekli rejim
48	0	2,64	9,23	13,83	20,00	5022	206893

39 h'de sürekli rejime gelmektedir, Şekil 9, Enerji kaybı 48 h için 206893 Wh olarak bulunur.



**Şekil 9. Güneş ışınımı gelen cam ve opak dış duvardan oluşan karma duvar sıcaklığının değişimi**

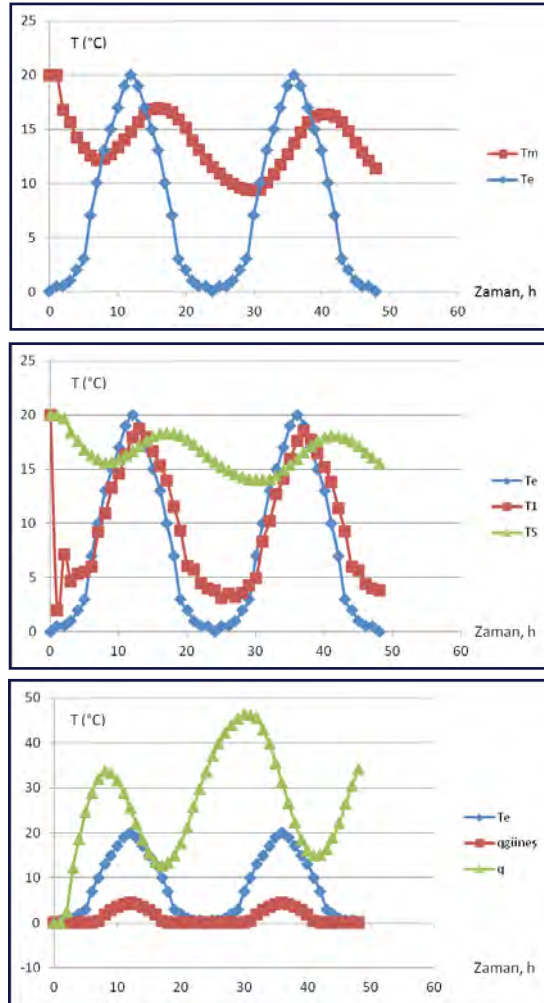
### 10. Eşit güneş ışınımı akısı gelen dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar ve değişken dış sıcaklık ve güneş ışınımı (geçici rejim)

Dış sıcaklık ve dış yüzeye gelen güneş ışınımının gün boyu değişimi,  $q_{\text{duvar}}$  ve  $q_{\text{cam}}$  göz önüne alınarak

aşağıdaki sıcaklıklar bulunur, Şekil 10 ve Tablo 10.  $q_{\text{duvar}}$ 'ın Şekil 8 ve Şekil 1'deki elektrik benzeşim modellerine göre duvarın ortasına geldiği, cama gelen güneş ışınımının  $q_{\text{cam}}$  direk içeri girdiği varsayılmıştır.

**Tablo 10. Değişken Dış Sıcaklık Ve Güneş Işınımı Gelen Karma Paralel Duvar, Geçici Rejim**

t h	$T_d$ °C	$T_1$ °C	$T_m$ °C	$T_s$ °C	$T_i$ °C	$q_{G,\text{duvar}}$ W	$q_{G,\text{cam}}$ Wh	q W	Q Wh
0	0	20	20	20	20	0	0	0	
1	0,50	2,00	20,00	20,00	20,00	0	0	0	
2	0,50	7,13	16,76	19,68	20,00	0	0	270	
12	20,00	18,10	15,65	16,92	20,00	2000	200	2407	
24	0	3,85	11,58	15,74	20,00	0	0	3601	
36	20,00	17,77	14,65	16,21	20,00	2000	200	3006	
48	0	3,81	11,48	15,67	20,00	0	0	3663	129755



**Şekil 10.  $q_{\text{güneş}}$  güneş ışınımı akısı gelen dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvarda  $T_e$ , değişken dış sıcaklığa göre duvar  $T_1$ ,  $T_m$  ve  $T_s$  sıcaklıklarının değişimi ve ısı kaybı**

### 11. Eşit güneş ışınımı akısı gelen dış duvar ve pencereden oluşan karma paralel duvar için geçici rejim; TS EN ISO 13790

Standart TS EN ISO 13790, EK C'de verilen denklem takımı, Şekil 1 bizim örnekteki verilere göre,  $H_{tr,em} = 714 \text{ W/K}$ ,  $H_{tr,ms} = 1000 \text{ W/K}$ ,  $H_{tr,w} = 44 \text{ W/K}$ ,  $H_{tr,is} = 846 \text{ W/K}$ ,  $H_{ve} = 10 \text{ W/K}$  alınarak

$H_{tr,1} = 9,9 \text{ W/K}$ ,  $H_{tr,2} = 55,3 \text{ W/K}$ ,  $H_{tr,3} = 52,4 \text{ W/K}$  ve  $q_{ic} = \varphi_{int} = 0$  ve  $q_G = \varphi_{sol} = 0$  için standarttaki  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$   $\varphi_{ia} = \varphi_m = \varphi_{st} = 0$  alınarak Standart C.4-11 denklemleri;

$$T_m^t = \frac{T_m^{t-1} \cdot [(C_m/3600) - ((H_{tr,3} + H_{tr,2})/2) + \varphi_{top}]}{[(C_m/3600) - ((H_{tr,3} + H_{tr,2})/2)]}$$

$$\varphi_{top} = H_{tr,em} \cdot T_m + H_{tr,3} \cdot (H_{tr,1} \cdot \varphi_{HC,nd} / H_{ve}) / H_{tr,2}$$

$$H_{tr,1} = \frac{1}{1/H_{ve} + 1/H_{tr,is}}$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w}$$

$$H_{tr,3} = \frac{1}{1/H_{tr,2} + 1/H_{tr,ms}}$$

$$T_m = (T_m^t + T_m^{t-1})/2$$

$$T_s = (H_{tr,ms} \cdot T_m + H_{tr,w} \cdot T_e + H_{tr,1} \cdot \varphi_{HC,nd} / H_{ve}) / (H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1})$$

$$T_{air} = (H_{tr,is} \cdot T_s + \varphi_{HC,nd}) / (H_{tr,is} + H_{ve})$$

yazılıp birbirlerine bağlı olarak çözümlenmiş sonuçlar bu çalışmadaki karma paralel duvar sonuçları (örnek 7) ile karşılaştırılmıştır, Tablo 11.

### SONUÇ

Sonlu fark denklemleri yardımıyla enerji tüketimi, sadece cam ve dış duvardan olduğu varsayılan bir oda için birbirlerine bağlı olarak eş zamanlı çözülmüştür. Odanın  $110 \text{ m}^2$  dış cephesi duvar olarak standart bir duvar (ağır duvar) alınmış, problem sürekli rejim problemleri ile karşılaştırılarak ve  $100 \text{ m}^2$  duvar,  $10 \text{ m}^2$  cam ile birlikte karma duvar, değişken dış koşullar ve güneş ışınımı göz önüne alınarak bulunan çözümler aşağıdaki tabloda özetlenerek, karşılaştırmalı olarak verilmiştir, Tablo 12. Cam ve duvardan oluşan karma duvar çözümü standarttaki yöntemle bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada önerilen yöntemlere göre bulunan çözümler bina enerji tüketimi hesapları yapılırken referans olarak alınabilir. Bu çözümleme yöntemi kullanılarak daha esnek bir ısı model oluşturulabilir.

**Tablo 11. TS EN ISO 13790 ile Bulunan Sonuçların Örnek 7 Sonuçları ile Karşılaştırılması**

	Zaman h	$T_d$	$T_1$	$T_m$	$T_s$	$T_i$	q
Bu çalışma	39	0	2,16	7,55	12,94	20,00	5973
Standart	39	0		7,91	13,06	20,00	5873
Fark				0,05	0,01		0,02

**Tablo 12. Örnek Çözümlerin Karşılaştırmalı Sonuçları**

	$T_d$ °C	$T_1$ °C	$T_m$ °C	$T_s$ °C	$T_i$ °C	$R_{toplamlam}$ (K/W)	q (W)	Q (Wh/2 gün)
Duvar ( $110 \text{ m}^2$ )	0	2,16	7,57	12,97	20	0,370	5945	285405
Geçici -rejim (3)	duvar							242770
Geçici -rejim (4)	Hafif duvar							276870
Geçici rejim (5)	Değişken sıcaklık							138780
Cam ( $10 \text{ m}^2$ )+duvar ( $100 \text{ m}^2$ )	0	2,16	7,55	12,94	20	0,0035	5978	286944
Geçici -rejim (7)	Cam farkı: Duvar + Cam : $248159 - 242770 = 5390 \text{ Wh}$							248159
Cam+duvar+güneş ışınımı	0	2,64	9,23	13,83	20	0,0024	5023	241112
Geçici -rejim (9)	Güneş ışınımı farkı = $248159 - 206893 = 41266$							206893
Geçici -rejim (10)								129755



## KAYNAKLAR

- [1] TS EN ISO 13790, Binaların Enerji Performansı, Mekan Isıtılması ve Soğutulması için Enerji Kullanımının Hesaplanması, Energy Performance Of Buildings - Calculation of Energy Use For Space Heating And Cooling (ISO 13790:2008), Mart 2013.
- [2] Incropera F. P., Dewitt D. P., Çev. Editör Tamer Derbentli, Heat and Mass Transfer, Palme Yayıncılık, 7. baskı, 2015.
- [3] Arpacı V. S., Conduction Heat Transfer, AddisonWestley Pub., 1966.
- [4] Dağsöz A. K., Isı İletimi, İTÜ, 1974.
- [5] Kakaç S., Yener Y., Heat Conduction, Middle East Technical University, 1979.
- [6] Kokogiannakis G., Strachan P. & Clarke J., Comparison of the Simplified Methods of the ISO 13790 Standard and Detailed Modelling Programs in a Regulatory Context, Journal of Building Performance Simulation, Vol. 1, No. 4, 209-219, December 2008.
- [7] Michalak P., The Simple Hourly Method of EN ISO 13790 Standard in Matlab/Simulink: A Comparative Study for the Climatic Conditions Of Poland, Energy 75, 2014, 568-578, 2014.