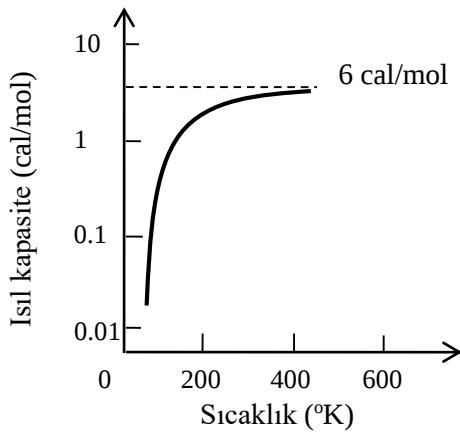


CİSİMLERİN ISIL ÖZELLİKLERİ

“Isıl özellik”, ısı değişimine karşı malzemenin gösterdiği tepkidir. Katı cisimler ısıtılınca bünye sıcaklıkları yükselir, genişir ve ısıyı enerji halinde depolarlar. Sıcaklık farkı oluştuğunda ısı enerjisi malzeme içinde soğuk bölgelere doğru taşınır. Isıl kapasite, ısı genleşme ve ısı iletkenlik cisimlerin uygulamada karşılaşılan en önemli özelliklerdir.

Isıl Kapasite: Isınan katı bir cisimde sıcaklığın yükselmesi katı cisim bünyesinde enerjinin depolanması anlamına gelir. “Isıl kapasite” herhangi bir cismin ısı depolama kapasitesinin bir göstergesidir. Isıl kapasite bir cismin sıcaklığını 1°C yükseltmek için gerekli ısı enerjini ifade etmektedir. Başka bir deyişle, ısı kapasite bir mol malzemenin sıcaklığını 1°C yükseltmek için gerekli enerji miktarıdır. Yüksek sıcaklıklarda, bir cismin ısı kapasitesi $C_p = 3 \times R = 6 \text{ cal/mol}$ değerine yaklaşır. Burada R gaz sabiti olup değeri 1.987 cal/mol dür. Bununla beraber, ısı kapasite aşağıdaki şekilde görüleceği üzere sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.



Bazı malzemeler için ısı kapasite değerleri:

Malzeme	Isıl kapasite (cal/mol)
C (Karbon)	1.8
H (Hidrojen)	2.3
B (Bor)	2.7
Si (Silikon)	3.8
O (Oksijen)	4.0
N (Nitrojen)	4.8
F (Florür)	5.0
P (Fosfor)	5.4
Diğerleri	~ 6.0

Isıl kapasite çoğunlukla cal/mol olarak ifade edilir.

“Özgül ısı”, ağırlığı veya kütlesi belli bir cismin sıcaklığını 1°C yükseltmek için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır ve c ile gösterilir. Özgül ısı ve ısı kapasite arasındaki ilişki

$$c = \frac{\text{Isıl kapasite}}{\text{Atom ağırlığı}} \text{ şeklinde verilebilir.}$$

Mühendislik hesaplarında, özgül ısı daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yukarıda verilen çizelgeden görüleceği üzere, günlük hayatta kullanılan cisimlerin özgül ısısı yaklaşık olarak 6 cal/mol dür. Bununla beraber, ısı kapasite cal/g cinsinden ifade edildiğinde, cisimlerin atom ağırlığı ve birim ağırlığı farklı olduğu için, ısı kapasiteleri de farklı olur. Örneğin, demirin ısı kapasitesi 0.107 cal/g iken alüminyumun 0.031 cal/g dır.

Isıl kapasitesi düşük olan cisimler çabuk ısınır ve çabuk soğurlar. Bu tür cisimlerin ısı depolama kapasiteleri oldukça azdır. Isıtarak cismin bünyesine taşınan ısı enerjisi atomların titreşimlerini artırır ve sonuçta ısı bu şekilde malzeme bünyesinde korunur.

Isıl Genleşme: Katı cisimlerin çoğu ısıtılınca genleşir ve soğutulunca büzülürler. Sıcaklığa bağlı olarak katı bir cismin boyunda meydana gelen değişim aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha \times (T_f - T_o) \quad \frac{\Delta l}{l_o} = \alpha \times \Delta T \quad \alpha = \frac{1}{l_o} \times \frac{\Delta l}{\Delta T} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$$

Burada, l_o ve l_f sırasıyla sıcaklığın T_o ’dan T_f ’ye değişmesi sonunda elemanın başlangıç ve nihai boyunu göstermektedir. Burada α bir malzeme özelliği olup “lineer ısı genleşme katsayısı” olarak bilinir. Cismin ısıtılması sonucu ne miktarda genleşeceği ile ilgili bir özellik olup birimi $[^{\circ}\text{C}]^{-1}$ dir. Isıtma ve soğutma doğal olarak cismin boyutlarını etkiler ve buna bağlı olarak cismin hacmi değişir. Sıcaklığa bağlı hacim değişimi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{\Delta V}{V_o} = \alpha_v \times \Delta T$$

Burada ΔV ve V_o sırasıyla hacim değişimi ve orijinal hacmi gösterirken, α_v hacimsel ısı genleşme katsayısını sembolize etmektedir. İzotrop cisimlerde hacimsel genleşme katsayısı lineer genleşme katsayısının yaklaşık 3 katı kadardır. Yani, $\alpha_v \cong 3\alpha$ dır.

$$V_o = l_1 \times l_2 \times l_3 \quad \Delta l = \alpha \times l_o \times \Delta T$$

$$V_o + \Delta V = (l_1 + \Delta l_1) \times (l_2 + \Delta l_2) \times (l_3 + \Delta l_3)$$

$$V_o + \Delta V = (l_1 + \alpha l_1 \Delta T) \times (l_2 + \alpha l_2 \Delta T) \times (l_3 + \alpha l_3 \Delta T)$$

$$V_o + \Delta V = (l_1 \times l_2 \times l_3) \times (1 + \alpha \Delta T)^3$$

$$V_o + \Delta V = V_o \times (1 + 3\alpha \Delta T + 3\alpha^2 \Delta T^2 + \alpha^3 \Delta T^3)$$

Üçüncü ve dördüncü terimler ihmal edilirse;

$$V_o + \Delta V = V_o \times (1 + 3\alpha \Delta T) \text{ olur. Her iki taraf } V_o \text{ ile bölünürse;}$$

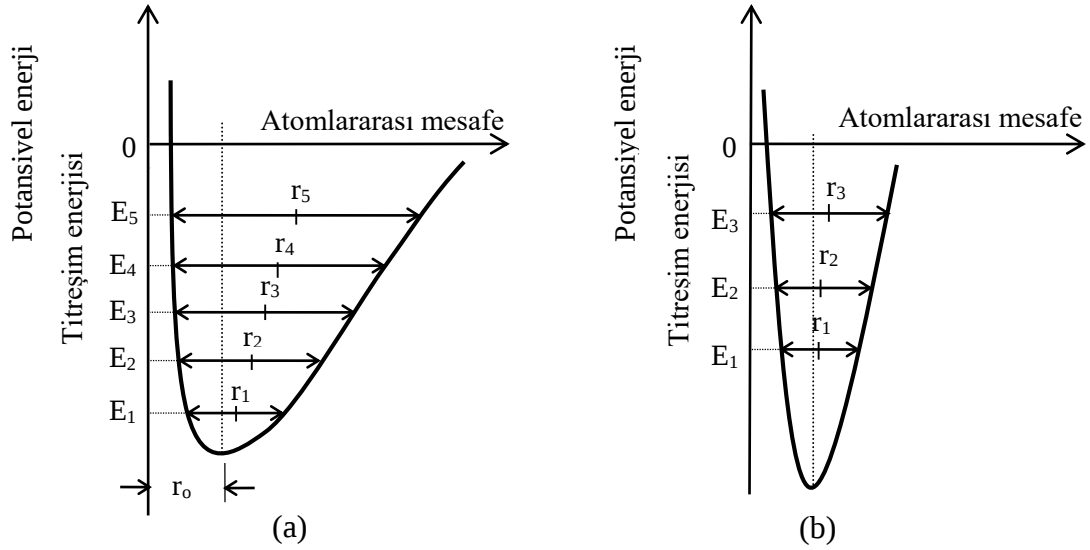
$$\frac{\Delta V}{V_o} = 3\alpha \times \Delta T \quad \text{elde edilir.}$$

Bazı malzemeler için lineer ısı genleşme katsayıları:

Malzeme	$\alpha [1/^{\circ}\text{C}]$
Al	24×10^{-6}
Cu	14×10^{-6}
Fe	12×10^{-6}
Beton	$10-12 \times 10^{-6}$
Tuğla	$5-8 \times 10^{-6}$
Cam	$4-9 \times 10^{-6}$
Ahşap	$4-5 \times 10^{-6}$

Pek çok malzeme için lineer ısı genleşme katsayısı $10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ mertebesindedir.

Mutlak sıfır sıcaklığında, atomlararası mesafe en küçük olup enerjileri minimumdur. Ancak malzeme ısıtıldığında atomların ısı enerjileri artarak belirli bir frekansta ve genlikte titreşmeye başlarlar. Isıl genleşme atomlararası ortalama mesafedeki artış ile ilgilidir. Bu durum daha önce bir katı cisim için verilen potansiyel enerji-atomlararası mesafe ilişkisi vasıtasıyla aşağıdaki gibi açıklanabilir.



- (a) Potansiyel enerji-atomlararası mesafe ilişkisi; sıcaklık artışına bağlı olarak mesafenin artışını göstermektedir. Atomlararası mesafe ısıtma sonucu r_0 'dan r_1 'e; r_2 'ye ve bu şekilde artmaktadır.
- (b) Simetrik bir potansiyel enerji-atomlararası mesafe eğrisi için, sıcaklığa bağlı olarak atomlararası mesafedeki artış ihmal edilebilir düzeydedir (örneğin, $r_1 = r_2 = r_3$).

Isıl genleşme, sıcaklık artışına bağlı olarak atomsal titreşim genliğinde meydana gelen artıştan ziyade potansiyel enerji çukurunun eğriliğiyle ilgilidir. Potansiyel enerji eğrisi simetrik olduğunda atomlararası mesafedeki artış çok küçüktür ve bu nedenle ısı genleşme ihmal edilir. Atomlararası bağlar kuvvetleştikçe ısı genleşme azalır ve cisimlerin ergime sıcaklığı yükselir. Bu ilişki aynı zamanda bu tür cisimlerin lineer ısı genleşme katsayılarının da düşük olduğunu göstermektedir.

Isıl Gerilme Hesabı

Sıcaklık değişimi sonucu cismin bünyesinde ısıl gerilmeler meydana gelir. İstenmeyen plastik deformasyonlara veya kırılmaya neden olabilen ısıl gerilmeleri iyi anlamak gerekir.

Sınırlanmış Isıl Genleşme ve Büzülme Kaynaklı Gerilmeler:

Sıcaklık farkının meydana gelmediği üniform olarak ısıtılan ve soğutulan bir homojen ve izotrop çubuk eleman düşünelim. Serbest genleşme ve büzülme halinde çubuk elemanda herhangi bir gerilme oluşmaz. Bununla beraber, çubuğu her iki ucundan sabitlemek suretiyle çubuğun eksenel şekil değiştirmesi sınırlandırılırsa ısıl gerilmeler doğar.

Sıcaklık T_0 'dan T_f 'ye değiştiğinde meydana gelen σ gerilmesiaşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma = E \times \alpha \times (T_f - T_0) = E \times \alpha \times \Delta T \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\alpha \times l_0 \times \Delta T}{l_0} = \alpha \times \Delta T \quad \sigma = E \times \varepsilon$$

Burada E elastik modülü ve α lineer ısı genleşme katsayısıdır.

Isıtma halinde ($T_f > T_o$), çubuğun genleşmesi engellendiği için gerilme basınçtır. Haliyle, çubuk soğutulursa ($T_f < T_o$), çubukta çekme gerilmesi meydana gelir.

Örnek: Bir metal çubuk iki uçundan sabitlenmiştir. Çubuk oda sıcaklığında (20°C) monte edildiğine göre, meydana gelen gerilme en fazla 172 MPa olması için çubuk hangi sıcaklığa kadar ısıtılmalıdır? Metal için elastiklik modülü 10^5 MPa ve lineer ısı genleşme katsayısı (α) $20 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ olarak alınacaktır.

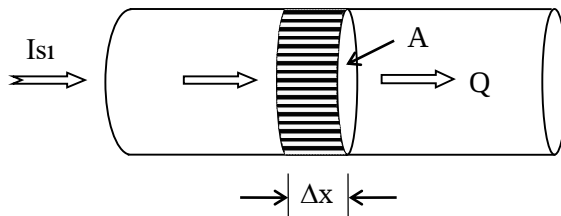
Çözüm: Çubuk ısıtıldığı için meydana gelen gerilme basınç olacaktır. Dolayısıyla, nihai sıcaklık T_f için çözüm yapılırsa,

$$T_f = T_o + \frac{\sigma}{E \times \alpha} = 20 + \frac{172}{10^5 \times 20 \times 10^{-6}} = 20 + 86 = 106^\circ\text{C} \text{ olur.}$$

Isıl İletkenlik: Isıl iletkenlik, ısıнын cismin sıcak bölgelerinden soğuk bölgelerine taşınımı olayıdır. Isıl iletkenlik, cismin ısı transfer özelliğini karakterize eder. Başka bir deyişle, alanı A ve kalınlığı Δx olan bir düzlemin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ΔT olduğunda birim zamanda geçen ısıнын hızını gösteren bir büyüklüktür.

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Burada q birim zamanda birim alandan geçen ısıyı (ısı debi), λ ısı iletkenliği ve $\Delta T/\Delta x$ iletken ortamın sıcaklık gradyanıdır.



Çubuk bir ucundan ısıtıldığında, çubukta oluşan bir sıcaklık gradyanı etkisinde çubuğun soğuk bölgesine doğru Q/A büyüklüğünde bir ısı akışı meydana gelir.

Kütle transferinde difüzyon katsayısının (D) oynadığı rolü ısı transferinde ısı iletkenlik katsayısı (λ) oynamaktadır. Başka bir deyişle, ısı iletkenlik katsayısı difüzyon katsayısına ve sıcaklık gradyanı ise konsantrasyon gradyanına karşılık gelmektedir.

Isı Taşınım Mekanizması

Isı enerjisi radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon olmak üzere üç şekilde yayılır.

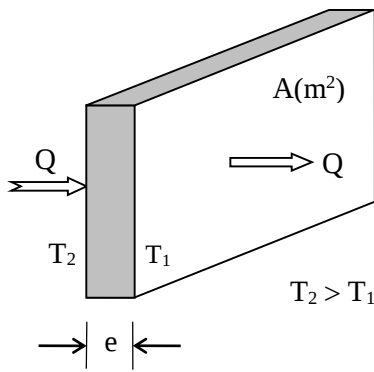
Radyasyon: Isı enerjisi bir noktadan başka bir noktaya elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılır. Taşınım için herhangi bir ortama gereksinim duyulmaz.

Konveksiyon: Burada ısı enerjisi bir noktadan başka bir noktaya cismin ısınan molekülleri vasıtasıyla taşınır. Doğal olarak böyle bir taşınım moleküllerin serbestçe hareket edebildiği yalnızca gaz veya sıvı ortamlarda meydana gelebilir.

Kondüksiyon: Konveksiyonun aksine burada ısınan moleküller yer değıştirmez. Buna karşın, ısınan moleküllerin enerjisi cisim içinde bir noktadan başka bir noktaya elektron hareketiyle taşınır. Bunun nedeni iletkenliği yüksek olan cisimlerin aynı zamanda iyi elektriksel kondüktör olmalarıdır.

Katı cisimlerde ısı taşınımı kondüksiyon yoluyla gerçekleşir. Isı taşınımı cismin ısıl iletkenlik katsayısı (λ) ile belirlenir.

Isıl İletkenlik Katsayısı (λ): Isıl iletkenlik katsayısı, iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı 1°C olan birim kalınlıkta (m) ve birim alana (m^2) sahip bir düzlemden birim zamanda (t) geçen ısı miktarı olarak tanımlanır. Isıl iletkenlik katsayısı deneysel olarak belirlenebilir.



Isıl debi:

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{T_2 - T_1}{e/\lambda} \quad [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}]$$

Bir düzlemin 1 m^2 alanından 1 saate geçen ısı miktarı.

Burada, λ ısıl iletkenlik katsayısı ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$); A düzlemin alanı (m^2), e düzlem kalınlığı (m), ve $\Delta T = T_2 - T_1$ düzlemin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ($^\circ\text{C}$) dır.

Özel hal:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 1^\circ\text{C}, A = 1 \text{ m}^2, \text{ and } e = 1 \text{ m olsun.} \quad q = \frac{Q}{A} \quad Q = q \times A = \lambda \quad q = \lambda \text{ olur.}$$

Isı yalıtımı açısından boşluklu malzeme kullanımı tercih edilir. Isı kaybını azaltmak için malzemelerin ısıl direnci e/λ artırılır. Bunun için ya e artırılır ya da λ azaltılır. Isıl iletkenlik katsayısı $0.05 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ den küçük malzemeler *ısı yalıtım malzemeleri* olarak bilinir. Camyünü, mantar ve plastik köpük gibi malzemeler ısı yalıtım malzemelerine örnektir.

Yapı elemanı farklı özellikte tabakalardan oluşması halinde, elemanın ısıl direnci her bir tabakanın ısıl dirençlerinin toplamına eşittir. Bu şekilde elde edilen ısıl direnç *eşdeğer ısıl direnç* olarak bilinir. Böylece,

$$D = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} \quad \text{elde edilir.}$$

Yalıtım hesaplarında, yukarıda ifade edilen ısıl debi bağıntısını kullanabilmek için yapı elemanının her iki yüzünün sıcaklığını bilmek gerekir. Hâlbuki pratikte ölçülen sıcaklıklar elemanın yüzey sıcaklıklarından ziyade elemanın yüzeyleriyle temas halinde olan ortam sıcaklıklarıdır.

Bir okulun dış duvarını göz önüne alalım. Sınıf içindeki ısı duvara konveksiyon yoluyla ulaşır. Duvar içinde ısı kondüksiyon yoluyla dış atmosfere ulaşır. Atmosferde ısı tekrar konveksiyon yoluyla yayılmaya devam eder. Isı yalıtımı hesaplarında, bu durumda, konveksiyon yoluyla ısı yayılımını dikkate alınması gerekir. Duvarın her iki tarafındaki ortamlarda hava sirkülasyonu hızları önemlidir. Bu durumda ısıl debi aşağıda verile bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$q = \frac{T_i - T_d}{\frac{1}{\alpha_i} + D + \frac{1}{\alpha_d}} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

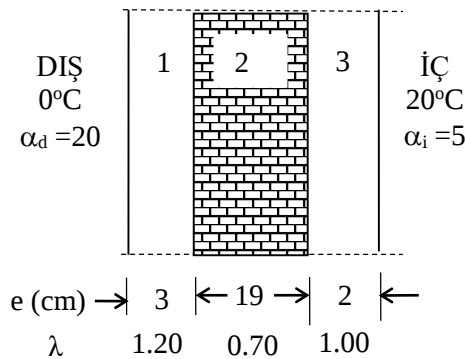
$\alpha_i = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (içerde)
 $\alpha_d = 20 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (dışarda)
 $\alpha_d = 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (dış pencerede)

Burada T_i ve T_d sırasıyla içerde ve dışarıdaki sıcaklıkları, α_i ve α_d içerde ve dışarıdaki konveksiyon katsayıları ve D eşdeğer ısıl direnci (tabakalı sistem için) göstermektedir.

Bazı malzemeler için ısıl iletkenlik katsayıları:

Malzeme	λ (k cal/mh $^\circ$ C)	Malzeme	λ (k cal/mh $^\circ$ C)
Doğal taş	2.0-2.5	Delikli tuğla	0.40-0.60
Kerpiç	0.4-0.8	Cam	0.70
Çimento harcı	1.20	Alüminyum	175
Alçı-kireç harcı	0.4-0.6	Ahşap	0.04-0.18
Beton	1.20-1.50	Cam fiber	0.035
Köpük beton	0.10-0.20	Mantar	0.035-0.080
Dolu tuğla	0.70	Hava	0.02

Örnek: En kesiti aşağıda verilen duvar için ısıl debiyi hesaplayınız.



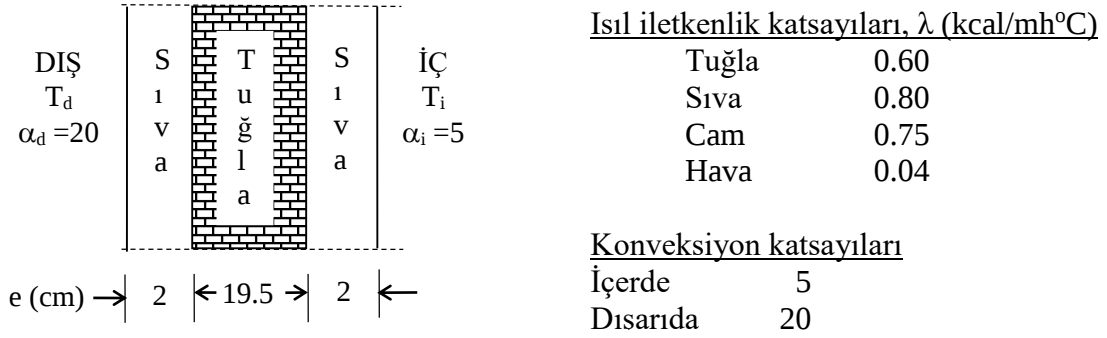
$$q = \frac{T_i - T_d}{\frac{1}{\alpha_i} + D + \frac{1}{\alpha_d}} \quad D = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

$$D = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}$$

$$D = \frac{0.03}{1.20} + \frac{0.19}{0.70} + \frac{0.02}{1.00} = 0.32 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/k cal}$$

$$q = \frac{20 - 0}{\frac{1}{5} + 0.32 + \frac{1}{20}} = \frac{20}{0.57} = 35.09 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Örnek: Bir odanın tuğla duvarına ilişkin aşağıdaki bilgiler verilmektedir:



- a) Duvarın eşdeğer ısıl direncini hesaplayınız.
- b) Uzunluğu 4 m ve yüksekliği 3 m olan bu duvara 2 m² lik bir pencere yapıldığında meydana gelen ısı kaybı hangi oranda artar? Pencerenin tamamı 6 mm camdır.

Çözüm:

a) Eşdeğer ısıl direnç: $D = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} = \frac{0.02}{0.80} + \frac{0.195}{0.60} + \frac{0.02}{0.80} = 0.375 \text{ m}^2 \text{h}^\circ \text{C/kcal}$

b) Isıl debi:

$$q_{\text{duvar}} = \frac{T_i - T_d}{\frac{1}{\alpha_i} + D + \frac{1}{\alpha_d}} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{5} + 0.375 + \frac{1}{20}} = \frac{\Delta T}{0.375 + 0.25} = \frac{\Delta T}{0.625} \text{ kcal/m}^2 \text{h}$$

$$q_{\text{pen}} = \frac{T_i - T_d}{\frac{1}{\alpha_i} + D + \frac{1}{\alpha_d}} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{5} + \frac{0.006}{0.75} + \frac{1}{20}} = \frac{\Delta T}{0.008 + 0.25} = \frac{\Delta T}{0.258} \text{ kcal/m}^2 \text{h}$$

Isı kaybı:

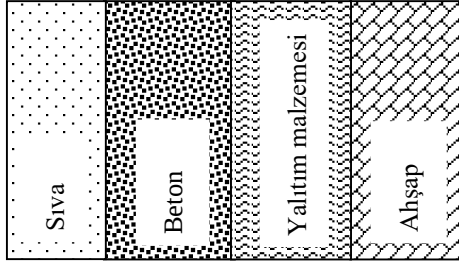
Yalnız duvar varken : $Q = q_{\text{duvar}} \times A = q_{\text{duvar}} \times (3 \times 4) = 12 \times q_{\text{duvar}} \quad [\text{kcal/h}]$

Cam varken : $Q = 10 \times q_{\text{duvar}} + 2 \times q_{\text{pen}} \quad [\text{kcal/h}]$

Artış oranı: $\frac{\text{Yeni miktar}}{\text{Eski miktar}} = \frac{10 \times q_{\text{duvar}} + 2 \times q_{\text{pen}}}{12 \times q_{\text{duvar}}} = \frac{\frac{10 \times \Delta T}{0.625} + \frac{2 \times \Delta T}{0.258}}{\frac{12 \times \Delta T}{0.625}} = 1.237 \approx 1.24$

Isı kaybındaki artış yaklaşık olarak %24 bulunur.

Örnek: Bir sınıfın dış duvarının en kesiti aşağıdaki gibidir.



a) Duvarın ısıl direnci $0.75 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ olacak şekilde yalıtım malzemesinin kalınlığını hesaplayınız.

b) Yalıtım malzemesi yerine beton kullanılmış olsaydı duvarın ısıl direncinin değişmemesi için beton kalınlığı ne kadar artırılmalıdır?

	Sıva	Beton	Yalıtım Malzemesi	Ahşap
Kalınlık, cm	4	18	?	2.4
λ , kcal/mh $^\circ\text{C}$	0.80	1.20	0.04	0.16

Çözüm:

a) Eşdeğer ısıl direnç

$$D = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} = 0.75 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$$

$$D = \frac{0.04}{0.80} + \frac{0.18}{1.20} + \frac{x}{0.04} + \frac{0.024}{0.16} = 0.75 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$$

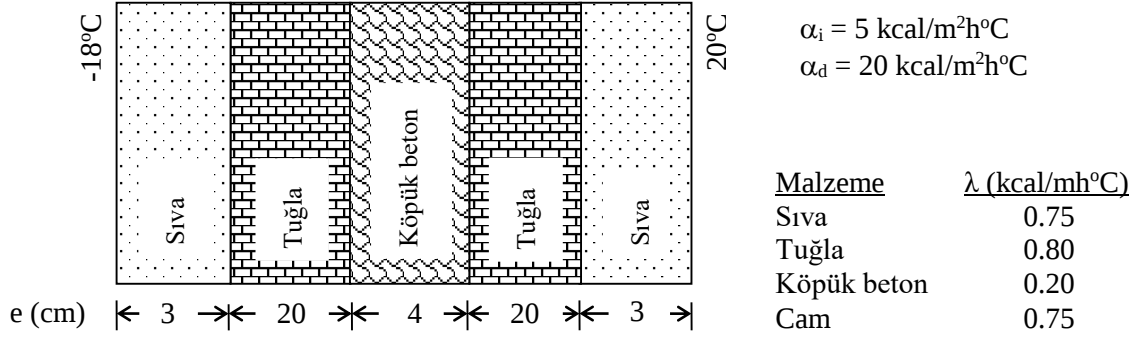
$$\frac{x}{0.04} = 0.75 - 0.35 = 0.40 \Rightarrow x = 0.016 \text{ m} = 1.6 \text{ cm}$$

b) İlave beton kalınlığı

$$D = \frac{0.04}{0.80} + \frac{X}{1.20} + \frac{0.024}{0.16} = 0.75 \quad \frac{X}{1.20} = 0.75 - 0.20 = 0.55 \Rightarrow X = 0.66 \text{ m} = 66 \text{ cm}$$

İlave beton kalınlığı $e = X - 18 = 66 - 18 = 48 \text{ cm}$ olur.

Örnek: Bir duvarın en kesiti aşağıda verildiği gibidir.



- Duvarın eşdeğer ısıl direncini hesaplayınız.
- İçerde ve dışarıda sıcaklıklar 20°C ve -18°C olduğuna göre ısıl debiyi hesaplayınız.
- 3 m yüksekliğinde, 6 m uzunluğunda bu duvarda günlük ısı kaybını hesaplayınız.
- Duvarda bir pencere yapılacaktır. Cam kalınlığı 6 mm dir. İlave ısı kaybının mevcut ısı kaybının %25'den fazla olmaması için pencere alanı ne olmalıdır?

Çözüm:

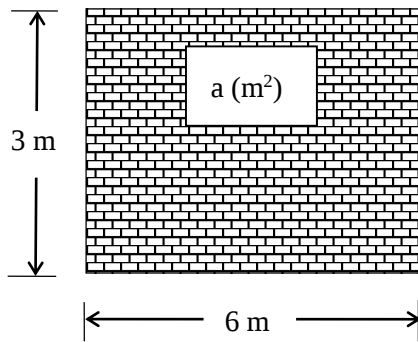
$$a) \quad D = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} = 2 \times \frac{0.03}{0.75} + 2 \times \frac{0.20}{0.80} + \frac{0.04}{0.20} = 0.78 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$$

$$b) \quad q_{\text{duvar}} = \frac{T_i - T_d}{\frac{1}{\alpha_i} + D + \frac{1}{\alpha_d}} = \frac{20 - (-18)}{\frac{1}{5} + 0.78 + \frac{1}{20}} \cong 36.9 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

$$c) \quad q_{\text{duvar}} = \frac{Q}{A} \Rightarrow Q = q_{\text{duvar}} \times A = 36.9 \times (3 \times 6) \cong 664.2 \text{ kcal/h}$$

$$Q = 664.2 \times 24 = 15940.8 \text{ kcal/gün}$$

$$d) \quad Q' = Q + \%25 \times Q = 664.2 + 0.25 \times 664.2 = 830.25 \text{ kcal/h}$$



$$A = 3 \times 6 = 18 \text{ m}^2$$

$$Q' = q_{\text{duvar}} \times (A - a) + q_{\text{pen}} \times a = 830.25 \text{ kcal/h}$$

$$\text{Cam için: } d = \frac{e}{\lambda} = \frac{0.006}{0.75} = 0.008 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$$

$$q_{\text{pen}} = \frac{20 - (-18)}{\frac{1}{5} + 0.008 + \frac{1}{20}} \cong 147.3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

$$Q' = 36.9 \times (18 - a) + 147.3 \times a = 830.25 \text{ kcal/h}$$

$$\Rightarrow a \cong 1.50 \text{ m}^2 \text{ olmalıdır.}$$