

YAZ KONFORU İLE İLGİLİ KAVRAMLAR VE STANDARD HESAP METODU

*M. Timur CİHAN**
*Şükran DİLMAÇ**

Özet: Türkiye’de binaların ısı performansını konusunda ilk akla gelen ısıtma (kış konforu) amaçlı enerji tüketimini sınırlandırmaktır. Bu tüketimi sınırlayan TS 825’de açıklanan hesap metodu kararlı rejim esaslarına dayanır. Yaz mevsiminde güneş enerjisinin etkisiyle hem hava sıcaklığı ve hem de elemanın dış yüzey sıcaklığı, gündüz ve gece arasında büyük değişim gösterir. Uluslararası standartlarda, yaz şartlarında sıcaklık ve ısı akışının değişimi sinüzoidal kabul edilmekte ve hesaplar sinüzoidal değişim gösteren periyodik rejim şartları için gerçekleştirilmektedir. Binaların ısı konforu açısından yeterli olabilmesi için, hem kış hem de yaz konforunun dikkate alınması ve her iki konfor açısından en uygun uygulamanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu konudaki Türk Standardı TS EN ISO 13786’dır ve ISO 13786’nın Türkçe tercümesidir. Bu standarda, periyodik rejim şartlarında hesaplanması gereken en önemli büyüklük iletim matrisidir. İletim matrisinden hareketle diğer tüm değişkenler hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, periyodik rejim şartlarında yapı elemanlarının ısı performanslarının değerlendirilmesi ile ilgili açıklamalar, temel bilgilerden başlayarak TS EN ISO 13786’da açıklanan hesap metoduna kadar geniş bir çerçeve içinde özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yaz Konforu, Standard Hesap Metodu, İletim Matrisi, TS EN ISO 13786.

Expressions and Standard Calculation Method for Summer Comfort

Abstract: In Türkiye, the first attempt to improve the thermal performance of buildings is to restrict the heating energy consumption. This is done based on the steady state method as outlined in TS 825. Both temperatures of air and external surface of elements show significant variations between day and night due solar energy in summer. In international standards, variations of temperature and heat flow in summer are assumed to be sinusoidal and calculations are performed accordingly. For efficiency of thermal comfort in buildings, both winter and summer comfort need to be taken into consideration at an optimum level. The relevant Turkish standard TS EN ISO 13786 is a translation of ISO 13786. In this standard, transfer matrix, which must be calculated in case of periodic regime conditions, is the most important entity from which all the other variables can be calculated. In this study, thermal performance of building components under periodic regime conditions were summarized comprehensively starting from basic information to the calculation method given in TS EN ISO 13786.

Key Words: Summer Comfort, Standard Calculation Method, Transfer Matrix, TS EN ISO 13786.

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının sınırlı olduğu dünyamızda, ülke gelişimine direkt fayda sağlamayan ısı konfor amaçlı enerji tüketiminin azaltılması doğrultusunda binalarda yalıtım konusuna önem verilme-ye başlanmıştır. Türkiye’de bina yalıtımı ile ilgili zorunlu Standard TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları”dır ve binalarda ısıtma amaçlı enerji ihtiyacının hesaplanması ve sınırlandırılmasına aittir[1]. Ancak önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere, TS 825’e uygun bir binanın kış şartları için yeterli olmasına rağmen yaz şartlarında aşırı ısınması ve ısı konfor şartlarının sağlanmadığı için mekanik soğutmaya ihtiyaç duyulabilmesi söz konusudur[2].

Isıtma (kış) ve soğutma (yaz) şartlarında meydana gelen ısı iletim rejimleri, ilgili hesap metodları ve konfor şartları üzerindeki etkili malzeme ve kesit özellikleri farklıdır. Binalarda kış konforu ile ilgili ulusal ve uluslararası standartlarda, hesap kolaylığı açısından ve sonuçların kabul edilebilir sap-

* Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu, Tekirdağ.

malar içinde kaldığı düşünülerek, ısı iletimi ile ilgili büyüklükler sabit rejim şartlarında hesaplanmaktadır[1,3-4]. Kış konforu için binalarda ısı yalıtımı uygulayarak ısı kaybının azaltılması ve iç yüzey sıcaklıklarının yükseltilmesi genel anlamda yeterli olmaktadır.

Yaz konforu için kararlı rejim şartlarının kullanılması, bu mevsimde yapı elemanlarını büyük ölçüde etkileyen güneş ışınlarının yoğun enerjisi ve bu enerjinin 24 saatlik periyotlarla değişmesi sebebiyle mümkün değildir. Bu değişimi sinüzoidal olarak kabul etmek genellikle tercih edilmektedir. Ancak, yaz şartlarında sıcaklık değişimi tam bir sinüs eğrisi değildir; havadaki bulutlanmalar sebebiyle sapmalar gösterir. Bu sapmaların hesaplamalarda sebep olduğu yanlışlıklarla ilgili araştırmalar yapılmaktadır[5]. Fakat halen uluslararası standartlarda, yaz şartlarında sıcaklık ve ısı akısının değişimi sinüzoidal kabul edilmekte ve hesaplar sinüzoidal değişim gösteren periyodik rejim şartları için gerçekleştirilmektedir. Bu konudaki uluslararası standard, "ISO 13786 -Thermal Performance of Building Components-Dynamic Thermal Characteristics -Calculation Methods"dır[6].

Türkiye’de binaların yaz konforu açısından da değerlendirilmesi gerektiği konusunda fikir birliği olmakla beraber, belediyelere sunulan projelerde periyodik rejim şartlarında hesaplamalar yapılmamakta ve binanın yaz şartlarındaki ısı performansını değerlendirilmemektedir. Bu konudaki Türk Standardı "TS EN ISO 13786 Bina Bileşenlerinin Isıl Performansı – Dinamik Isıl Özellikler – Hesaplama Metotları"[7] ISO 13786’nın Türkçe tercümesidir. Bu standartlarda açıklanan, hesap metodu ülkemiz için oldukça yenidir. Sadece standardın okunması ile hesapların yapılabilmesi uygulamadaki mimar ve mühendisler için oldukça zordur. Malzeme özelliklerinin sönüm oranı ve faz kayması üzerine etkilerini inceleyen veya kısmi diferansiyel denklem için tek boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu sayısal veya analitik çözüm öneren çok sayıda ulusal ve uluslararası yayın mevcuttur. Fakat ISO 13786’da açıklanan metotla ilgili Türkçe yayın tespit edilememiştir. Bu çalışmanın amacı yaz şartlarında mekanik soğutmaya ihtiyaç duyulmadan iç ortamda ısı konforunun sağlanabilmesi için bu hesap metodunun kolaylıkla kullanılabilir şekilde anlaşılır hale getirilmesidir. Bu amaçla "ISO 13786’da açıklanan metotla" ilgili çok sayıda yayının sahibi Davies M.G.’in yayınları kronolojik sırada incelenmiş ve bu metotla ilgili Akander J.’nin Doktora tezi de incelendikten sonra, metot çok sayıdaki kesite uygulanmıştır[8-14]. Bu çalışmaların sonunda elde edilen tecrübe ile TS EN ISO 13786’daki hesap metodu gerekli yerlerde ilave açıklamalarla birlikte, uygulamadaki İnşaat Mühendisi, Mimar ve Makine Mühendislerinin kolayca kullanabilecekleri şekilde açıklanmıştır. Böylece ülkemizde binaların yaz şartlarındaki performanslarının değerlendirilmesinin de, TS 825’in kullanımı kadar yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Aslında TS EN ISO 13786 sadece yaz şartları ile sınırlı değildir. Periyodik rejimin gerçekleştiği tüm şartlarda kullanılabilir. Ancak kış şartlarındaki hesaplamalar daha önce de belirtildiği gibi EN 832, ISO 9164 ve TS 825’de kararlı rejim şartları için değerlendirildiğinden TS EN ISO 13786’nın kullanımına gerek kalmamaktadır. Hâlbuki yaz şartlarında yapı elemanlarının ısı performansları ancak periyodik rejim şartları ile değerlendirilebileceğinden, soğutma sezonu (yaz konforu) için Standard hesaplamalarda TS EN ISO 13786 standardının kullanılması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada, periyodik rejim şartlarında yapı elemanlarının ısı performanslarının değerlendirilmesi ile ilgili açıklamalar, temel bilgilerden başlayarak ISO 13786’da açıklanan hesap metoduna kadar geniş bir çerçevede özetlenmiştir. TS EN ISO 13786’dan farklı olarak bu makaleyi okuyan kişilerin, periyodik rejim şartlarındaki eleman davranışlarını ve ortamlardaki sıcaklık ve ısı akısı değişimlerini kolaylıkla hesaplayabilmelerinin mümkün olması ümit edilmektedir. Türkiye’de kullanılan çok sayıdaki farklı yapı elemanı kesitleri için gerçekleştirilen kapsamlı hesap sonuçlarının ise bu makalenin arkasından sunulması planlanmıştır.

2. KARARLI (SABİT) REJİM

Kararlı rejim, sabit sıcaklıklar etkisinde meydana gelen ısı iletimidir; herhangi iki eşit zaman aralığında iletilen ısı enerjisi miktarı aynıdır. Kararlı rejim şartlarında sadece elemanın ısı iletimine karşı gösterebildiği ısı direnç önemlidir. Bu direnç, elemanı oluşturan katmanlardaki malzemelerin ısı iletkenlik değerleri (λ) ve katman kalınlıklarından (d) faydalanılarak bulunur. Her katmanın ısı direnci d/λ ile hesaplanır ve bunların toplamları elemanın sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki toplam ısı direncini verir. Katmanların sıralanmasının, elemanın ısı davranışı üzerine bir etkisi yoktur. Bu rejimde, sadece elemandan iletilen ısı enerjisi miktarı ve kesit sıcaklıkları hesaplanır[15] (Şekil 1). Kullanılan eşitlikler aşağıda sıralanmıştır (Eşitlik 1-3).

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

d kalınlığındaki homojen bir katman için:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_2 - T_1), \quad (2)$$

Çok tabakalı bir katan için:

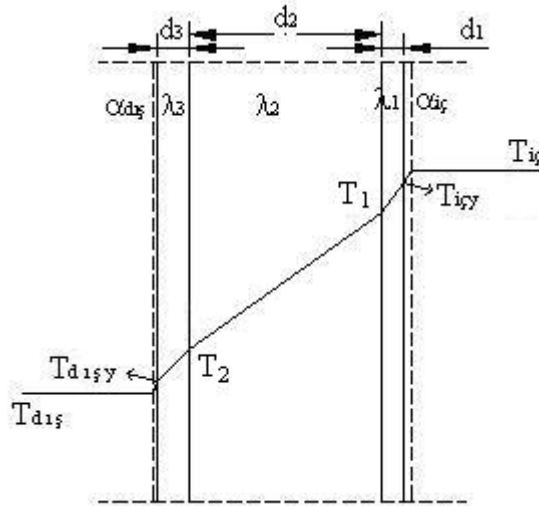
$$q = U \cdot (T_2 - T_1), \quad U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_{dış}}}, \quad \frac{1}{\Lambda} = \sum \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

Burada önemli olan ısı yalıtımı için belli bir kalınlığa ihtiyaç duyulmasıdır. Isıl iletkenliği çok küçük olsa bile boya vb. çok ince malzemelerle ve hatta ısıl iletkenliği düşük sıvalar ile klasik anlamda ısı yalıtımı sağlanamaz. Ancak bu malzemeler, ısıl ışınların yüksek oranda içeri yansıtılmasını sağlayarak iç yüzey sıcaklıklarının yükselmesine ve iç ortam ısıl konforuna katkıda bulunabilirler. Dış yüzeylerde kullanıldıklarında ise güneş ışınlarını yansıtarak dış yüzey sıcaklığının aşırı yükselmesini önleyerek yine iç ortam ısıl konforuna katkıda bulunurlar. Ancak uygulamadaki teknik elemanların bu konularda ciddi hatalar içinde oldukları ve ısıl iletkenlikleri düşük sıva ve boyaları ısı yalıtım sistemleri olarak ve hatta mantolama sisteminin yerine kullanılabilecek seçenekler olarak sunabildikleri görülmektedir.

Diğer bir önemli konu, ısıl iletkenlik için üç farklı değer söz konusu olmasıdır: Isıl iletkenlik ölçüm değeri, $\lambda_{ölçüm}$, Isıl iletkenlik beyan değeri, λ_{beyan} , ve Isıl iletkenlik hesap değeri λ_{hesap} . $\lambda_{ölçüm}$ doğrudan ölçüm sonuçlarını tanımlar, λ_{beyan} ölçüm sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi sonucu elde edilen %90 güvenlikli değerdir. λ_{hesap} ise kullanım sırasında üründeki su içeriğinin artması veya yaşlanma vb. olumsuzluklar sonucu meydana gelecek artışların da dikkate alındığı değerdir. Küçükten büyüğe doğru $\lambda_{ölçüm} < \lambda_{beyan} \leq \lambda_{hesap}$ şeklinde bir sıralama yapılabilir.

Kararlı rejim şartlarında kesit sıcaklıkları, iç yüzey ve dış yüzey sıcaklıkları (4) nolu eşitlikler ile belirlenir (Şekil 1):

$$T_{içy} = T_{iç} - q \cdot (1/\alpha_{iç}), \quad T_{dış} = T_{dışy} - q \cdot (1/\alpha_{dış}) \quad (4)$$

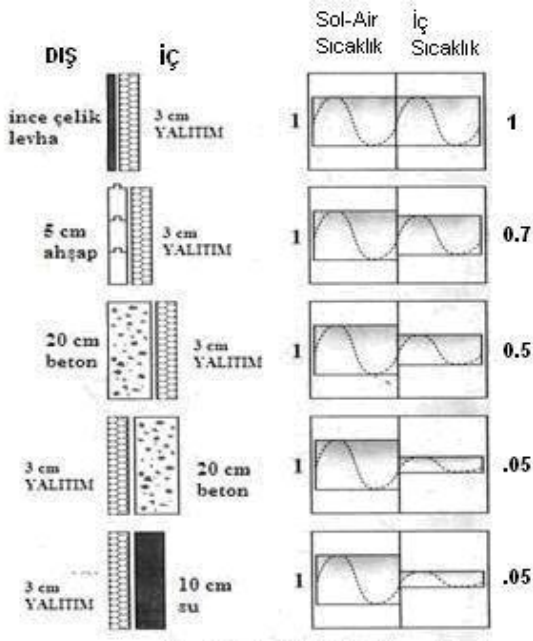


Şekil 1:

Kararlı rejim şartlarında çok katmanlı elemanda kesit içinde sıcaklık değişimi [16].

3. DEĞİŞKEN VE PERİYODİK REJİM

Değişken rejim, değişken sınır şartları (sıcaklıklar) etkisinde meydana gelen ısı iletimidir; herhangi iki eşit zaman aralığında iletilen ısı enerjisi miktarı farklıdır. Binalar için değişken şartlardaki ısı iletimi, değişken rejimin özel hali olan, sıcaklığın ve ısı akısının 24 saatlik bir periyotla sinüzoidal değişim gösterdiği “periyodik rejim” şartlarında incelenmektedir. Periyodik rejim şartlarında elemanın ısı direncinin yanında, elemandan ısının yayılımı (geçiş hızı) ve elemanda ısının depolanabilme kapasitesi de önemlidir. Bu özellikler üzerinde, elemanı oluşturan malzemelerin ısıl iletkenlikleri ile birlikte özgül ısılarının ve yoğunluklarının da büyük önemi vardır. Ayrıca değişken rejim şartlarında, elemanın ısıl davranışı üzerinde, katmanların sıralanışı da etkilidir (Şekil 2).



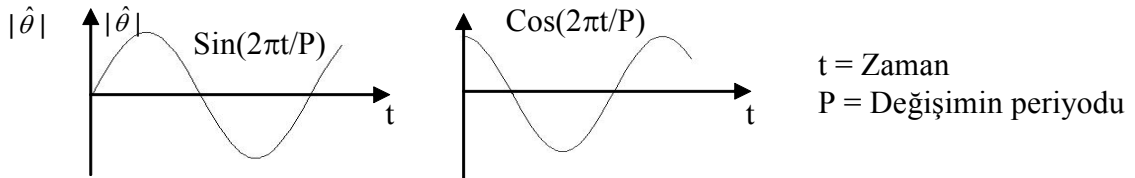
Güneş-Hava sıcaklığı: dış yüzü etkileyen güneş ışınım şiddeti ve dış ortam sıcaklığının etkisini birlikte ifade eden ve gölgede ki bir eleman için tanımlanan eşdeğer sıcaklık. Gölgede kabul edilen yapı elemanında, güneş-hava sıcaklığının oluşturduğu ısı akımının hızı ve dağılımı, gerçek durumda oluşan ısı akımının hız ve dağılımına eşdeğerdir.

Şekil 2:

Değişken rejim şartlarında malzeme sırasının sıcaklık değişim genliği üzerine etkisi[17].

Periyodik rejimde sıcaklık, genellikle T yerine θ sembolü ile ifade edilmektedir. TS EN ISO 13786 standardında karmaşık sayılar kullanılmaktadır ve $\hat{\theta}$ sinüzoidal değişimin karmaşık genliğini göstermektedir.

Sinüzoidal değişim, sıcaklığın maksimum ve minimum değerler arasında $\sin(2\pi t/P)$ veya $\cos(2\pi t/P)$ 'ye bağlı olarak değişmesidir¹¹ (Şekil 3). Günün hangi saatinin başlangıç olarak alınacağı önemli değildir; t sıfır (0)'dan başlatılır¹¹.

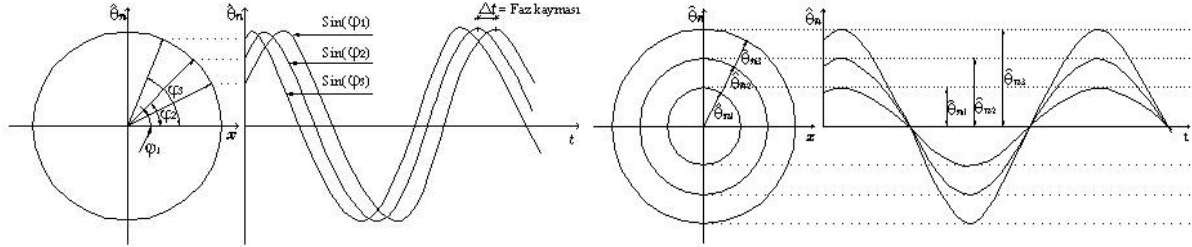


Şekil 3:

Periyodik rejimde sıcaklığın zamanla değişimini gösteren Sin ve Cos grafikleri[17].

Periyodik rejimde, iletilen ısı enerjisi miktarı ve kesit sıcaklıklarının yanında, ortam ve/veya yüzey sıcaklıklarının genliklerinin değişim oranı (sönüm oranı) ve dış sıcaklığın iç ortamı etkilemesi için geçen süre (faz kayması - zaman ötelenmesi) de hesaplanır[15]. Faz kaymasının (zaman ötelenmesinin) daha genel tanımı için “bir olayın en büyük genliği ile bu olayın etkisinin en büyük genliği

arasındaki zaman farkıdır” ifadesi kullanılmaktadır[18]. Genlik azalması ve faz kayması genel anlamda dairesel harekette, farklı açı ve genlikle meydana gelen hareketlerin zamana göre değişimlerinin incelenmesi sonucu ortaya çıkan büyüklüklere, yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, genlik azalması, dairesel hareketteki en büyük genlikteki azalma; faz kayması ise aynı genliğin meydana geldiği zamandaki ötelenme olmaktadır. Şekil 4’de faz kayması ve genlik azalmasının bu açıdan ifadesi gösterilmiştir.



Şekil 4:

Farklı faz açıları için sinüs eğrileri (aynı periyotta fakat faz farkı ile gerçekleşen dairesel hareketlerin zaman ekseninde gösterimi)¹⁶ ve farklı genlikler için sinüs eğrileri (aynı periyotta fakat farklı genlikteki dairesel hareketlerin zaman ekseninde gösterimi) [16].

Faz kayması ve sönüm oranı malzeme özelliği değil, eleman özelliğidir. Belli bir kalınlık için tariflidir. Bu büyüklüklerin yapı malzemeleri için tanımlanması anlamlı değildir. Çünkü hiçbir binada sadece çimentodan, alçıdan veya asfalttan bir eleman olmaz.

ISO 13786’da, genel anlamda verilen zaman ötelenmesi (≡ time shift), faz açısının negatif veya pozitif olmasına göre farklı şekilde isimlendirilmektedir[6]. Faz açısının negatif olması durumu “time lag” olarak isimlendirilirken; pozitif olması durumu “time lead” olarak tanımlanmaktadır. Ancak, uluslararası makalelerde bu ayırım henüz yapılmamaktadır. Ülkemizde de genel olarak zaman ötelenmesi (≡ faz kayması veya faz farkı) tanımları “time shift”in yerine kullanılmakta; başka terimler belirtilmemektedir. TS EN ISO 13786’da bu büyüklük için “zaman kayması” ifadesi kullanılmakta ise de, bu makalede teknik yayınlarda alışılmış ifade olan “faz kayması” ifadesi kullanılmıştır.

Değişken rejim şartlarında bir boyutlu ısı iletiminin zamana bağlı davranışını ifade etmek üzere;

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \quad (\text{Fourier formülü}) \text{ eşitliği kullanılır.} \quad (5)$$

Bu eşitlikteki “a” katsayısının, ısıl iletkenlik ile doğru, özgül ısı ve yoğunluk ile ters orantılı olarak etkilendiği bilinmektedir. Periyodik rejimde elemanın ısıl davranışını belirleyen malzeme özellikleri yukarıda belirtildiği gibi λ , ρ ve c ’dir ve elemanın ısıl davranış ile ilgili büyüklüklerde “ $\lambda\rho c$ ” olarak veya “ $\lambda/\rho c$ ” olarak görülür.

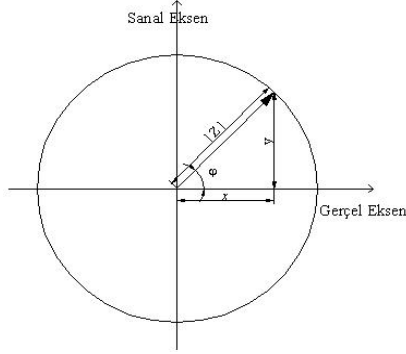
(5) nolu denklemin karmaşık sayılar kullanılarak genel çözümü için ISO 13786’da aşağıdaki (6) nolu eşitlik verilmiştir (Bölüm 4.1).

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| \cos(\omega t + \psi) \quad (6)$$

Ancak hesaplarda sinüs ve kosinüslü ifadeler yerine, ekspanansiyel gösterimin kullanılması tercih edilir[11]. $\exp(j\varphi)$ yatayla φ radyan açısı yapan birim uzunluktaki vektörü ifade eder[11] (Şekil 5). Yukarıda belirtilen vektör fiziksel olarak anlamlı bir büyüklüğü açıklamak için kullanıldığında; vektörün yataydaki izdüşümünün $[\equiv \text{Cos}(\varphi)]$, gözlemlenebilir bir büyüklüğe karşılık geldiği kabul edilir [11]. $\exp(j\varphi)$ φ üzerinde periyodiktir:

$$\exp(j(\varphi+\pi)) = -\exp(j\varphi) \text{ ve } \exp(j(\varphi+2\pi)) = \exp(j\varphi) \quad [11]. \quad (7)$$

Isı iletiminin periyodik değişimi için bu yaklaşım kullanıldığında, yüzey sıcaklığının değişiminin sinüzoidal olduğu kabulü ile ve $\hat{\theta}_n$ yüzeydeki sıcaklık değişiminin karmaşık genliğini ifade etmek üzere, yüzey sıcaklık değişimi $\hat{\theta}_n \exp(j2\pi t/P)$ şeklinde yazılabilir [11]. Yüzey sıcaklığı $t = 0, P/4, P/2, 3P/4, P$ zamanlarında sırasıyla $\hat{\theta}_n, 0, -\hat{\theta}_n, 0, \hat{\theta}_n$ olacaktır [11]. şekil 5’de periyodik rejim şartlarında karmaşık sayıların kullanılışı ile ilgili açıklamalar verilmiştir.

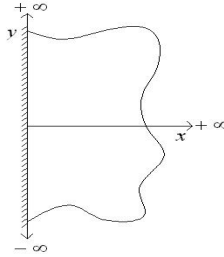


$$\begin{aligned} Z &= x + jy \\ j &= \sqrt{-1} \\ Z &= |Z| \cdot \exp(j\varphi) \\ Z &= |Z| \cdot (\cos\varphi + j \sin\varphi) \\ |Z| &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ y &= |Z| \cdot \sin\varphi \\ x &= |Z| \cdot \cos\varphi \end{aligned}$$

Şekil 5:

Periyodik rejim şartlarında kompleks sayıların kullanımı ile ilgili açıklamalar[16].

Periyodik rejim için, yarı sonsuz kalınlıktaki cisimde ısı iletiminin dalga hareketi yalnızca pozitif doğrultuda mümkün olur [11] (Şekil 6). Yüzeyden x mesafesinde ve t zamanında ölçülen sıcaklık ISO 13786’da ve genellikle diğer uluslararası yayınlarda $\theta(x, t)$ ile gösterilmektedir. [11] nolu kaynakta bu konu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir ve ISO 13786’nın temelini oluşturan bilgileri içermektedir. (8–13) arasındaki eşitlikler ve açıklamalar bu kaynağa aittir. [11] nolu kaynakta verilen sayısal örneklerin yanına ülkemizde kullanılan malzemelerle ilgili örnekler de eklenmiştir.



Şekil 6:

Yarı sonsuz cisim [16]

Katı içerisindeki herhangi bir kesitte gerçekte ısı akısı, $q(x, t)$, (8) nolu eşitlikle; katı içindeki sıcaklık, $\theta(x, t)$, ise (9) nolu eşitlikle verilmektedir [11].

$$q(x, t) = -\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$\theta(x, t) = \hat{\theta}_n \exp \left[- \left(\frac{\pi \rho c x^2}{P \lambda} \right)^{1/2} \right] \exp \left[-j \left(\frac{\pi \rho c x^2}{P \lambda} \right)^{1/2} \right] \exp \left[j \frac{2\pi t}{P} \right] \quad (9)$$

(9i) (9ii) (9iii) (9iv)

(9) nolu eşitlikte ilk terimin (9i), etkili olan değişimin genliğini ifade ettiği, ikinci (9ii) terimin, katı içinde genliğteki eksponansiyel azalmayı belirttiği, üçüncü (9iii) terimin, t ’nin herhangi bir sabit değerinde, $\theta(x, t)$ ’nin “ x ” üzerinde periyodik olduğunu belirttiği ve dalga boyunun (Λ) aşağıdaki (10) nolu eşitlik ile hesaplanabileceği belirtilmektedir [11].

$$\Lambda = \left(\frac{4\pi P \lambda}{\rho c} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Üçüncü (9iii) ve dördüncü (9iv) terimleri aşağıdaki eşitliği verecek şekilde birleştirilmekte ve aşağıdaki açıklamalar verilmektedir [11].

$$\theta(x, t) = \hat{\theta}_n \exp \left[- \left(\frac{\pi \rho c x^2}{P \lambda} \right)^{1/2} \right] \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} \right) \right] \quad (11)$$

(9i) (9ii) (11v)

(11v) nolu terim dalganın hareketi için standart matematiksel ifadenin bir parçası olmaktadır. “P” dalga hareketinin zaman periyodikliğini, “Λ” uzay periyodikliğini göstermektedir ve “a = λ/ρc, yayınım katsayısına” bağlıdır [11].

Dalga oldukça yüksek bir sönümlemeyle ilerler. Sadece bir dalga boyu derinliğinde (x = Λ) ikinci (9ii) genlik terimi exp(-2π) veya 1/535 değerini alır. Örneğin tuğlalar için λ = 0.84 W/mK, ρ = 1700 kg/m³ ve c = 800 J/kgK olması durumunda Λ = 0.82 m’dir ve bu derinlikte sıcaklık değişimi, gün boyunca yüzeydeki değişimin yalnız 1/535’de biri kadar olacaktır¹¹. Ülkemizde yatay delikli tuğlalar kullanılmaktadır. Malzeme özellikleri olarak, λ = 0.45 W/mK [1], ρ = 700 kg/m³ [1] ve c = 921.6 J/kgK¹⁹ alınırsa dalga boyu Λ = 0.76 m olur ve genlikte 1/535 oranında bir azalma meydana gelmesi için 0.82 m yerine 0.76 m gerektiği anlaşılmaktadır.

Yapı elemanının ısı davranışı, ayırdığı ortamlardaki değişimden ziyade yüzeylerindeki değişimlerle ifade edilir. Bu durumda (12) nolu eşitlik ile yüzeydeki birim sıcaklık değişimi için, sonsuz kalınlıktaki bir elemanın yüzeyinden gerçekleşmesi gereken ısı akısının hesaplandığı düşünülebilir ve bu oran, karakteristik kabul (characteristic admittance) olarak isimlendirilmektedir. Vektörel bir büyüklük olan karakteristik kabul kalınlıktan bağımsızdır¹¹.

$$\frac{q(0, t)}{\theta(0, t)} = \left(\frac{2\pi \lambda \rho c}{P} \right)^{1/2} \exp \left(j \frac{\pi}{4} \right) = \bar{a} \quad (12)$$

(12i) (12ii)

Eşitlik (12)’deki (12i) teriminin karakteristik kabulün büyüklüğünü gösterdiği belirtilmektedir. Bu terimde λ/ρc (veya ρc/λ) yerine, λρc ifadesi bulunmaktadır. λρc çarpımı malzemenin, yüzeyinden temas eden ısıyı içeri doğru yönlendirme ve bu yüzeyin arkasında depolama kabiliyetini gösterir [11]. λ/ρc’den farklı olarak, λρc malzemeden malzemeye büyük değişim gösterir. Sonuç olarak tuğla veya beton, yalıtım malzemelerinden çok daha yüksek karakteristik kabul değerine (admittance) sahip olacaktır. Bazı malzemeler için bu büyüklüklerin değerleri [16] nolu kaynaktan verilmiştir.

Malzemenin ısı kapasitesi veya depolama kabiliyeti (ρc), yalnızca zaman içinde değişen rejimde anlamlı olacağı; periyodik ısı akısı durumunda ısı kapasitenin, daima periyodik zamanla birlikte görüleceği (ρc/P); P büyüdükçe (kararlı rejim şartlarına yaklaştıkça), tabiatıyla (12) nolu denklemdeki ısı akısının da sifıra yöneleceği belirtilmektedir [11].

Günlük sinüzoidal değişime maruz tuğla için (λ = 0.84 W/mK, ρ = 1700 kg/m³, c = 800 J/kgK) karakteristik kabulün büyüklüğü 9.1 W/m²K’dir. Yoğun normal beton daha büyük değerlere, hafif malzemeler ise daha küçük değerlere sahiptir [11]. Ülkemizde kullanılan boşluklu tuğlayı göz önüne alırsak (λ = 0.45 W/mK [1], ρ = 700 kg/m³ [1] ve c = 921.6 J/kgK [19]) karakteristik kabul değeri 4.59 W/m²K bulunur.

Tekrar (12) nolu eşitliğe dönülürse, (12ii) terimi θ ve q’nun sinüzoidal olarak değişmesi durumunda, maksimum değerlerinin aynı zamanda meydana gelmediğini göstermektedir. Ortamla yüzey arasındaki ısı alışverişi söz konusu olduğunda q fazının, sıcaklığın önünde olduğunu ve bu zaman farkının açı olarak π/4 radyan (≅ 45°, zaman olarak çevrimin 1/8’i veya 24 saatlik çevrimde 3 saatlik bir süre) olduğunu göstermektedir [11]. Eğer cisim tamamen direnç olarak düşünülürse, q sıcaklıkla

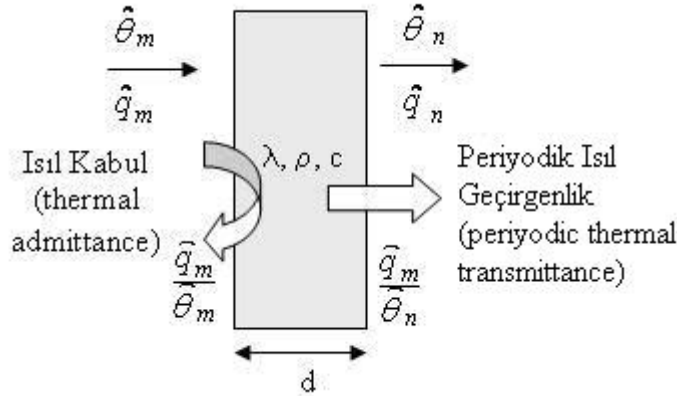
aynı fazda olacaktır. Eğer dilim tamamen kapasitans olarak düşünülürse, q sıcaklığın 90° önünde olacaktır, yani ısı akısı önde olmak üzere q ile θ zıt fazlı olurlar [11]. Bu durum elektriksel yüklü kondansatöre benzetilebilir. Kondansatör yükü dolu iken voltaj maksimumdur, fakat akım sıfırdır. Kondansatörün iki yüzünün iletkenle birleştirilmesi sonucu akım maksimum olurken voltaj sıfır olur.

Bir başka deyişle bu durum, kapasite bir sıcaklık göstermeden önce, ısı kapasiteye girmelidir şeklinde ifade edilebileceği; yarı sonsuz cisim durumunda, q'nun zaman ötelenmesinin, duvarın tamamen direnç veya tamamen kapasite olması durumundaki zaman ötelenmesinin yarısı kadar olacağı belirtilmektedir [11].

Karakteristik kabul cisim kalınlığından bağımsızdır ve yarı sonsuz cisim için hesaplanır. Fakat yapı elemanlarında bu hesaplamalar sonlu kalınlıktaki bir cisim için yapılır. Sonlu kalınlıktaki bir cisim için hesaplamalar ve kavramlar az da olsa değişim gösterir.

Sonlu kalınlıktaki bir cisim (levha, duvar vb.) için, diğer yüzeydeki etki (sıcaklık) sıfır olduğunda; ısı akısının o yüzeyde meydana gelen birim sıcaklık değişimi için değeri esas alınır ve $\left(\frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_m}\right)_{\hat{\theta}_n=0}$ oranı ile hesaplanarak yapı elemanının ısı kabulü (thermal admittance) olarak ifade edilir [11] (Şekil 7).

Sonlu kalınlıktaki bir dilim için farklı yüzeyler incelendiğinde ise, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı sebebiyle, etkileyen yüzeyden etkilenen yüzeye doğru periyodik bir ısı iletimi gerçekleşir (Şekil 7). Bu durumda periyodik ısı iletkenlik “periodic thermal transmittance” esas alınır ve $\left(\frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_n}\right)_{\hat{\theta}_m=0}$ oranı ile hesaplanmaktadır (Şekil 7) [11, 14].



Şekil 7:

Yapı elemanında meydana gelen ısı kabul ve periyodik ısı geçirgenliğin şematik gösterimi [16].

Yarı sonsuz kalınlıktaki cisimde ısı iletimini sağlayan dalga hareketinin yalnızca pozitif doğrultuda mümkün olabileceği yukarıda belirtilmişti (Eşitlik 8). Hâlbuki sonlu kalınlıktaki bir cisim içindeki ısı alan her iki doğrultudaki dalganın bileşiminden meydana gelebilir. Bu durumda $\hat{\theta}_{n+}$ ve $\hat{\theta}_{n-}$ her iki doğrultulardaki dalgaların genliği olarak alındığında, (8) nolu eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilecektir [11]:

$$\frac{\theta(x,t)}{\exp(j2\pi t/P)} = \hat{\theta}_{n+} \exp\left[-\left(\frac{\pi\rho c}{P\lambda}\right)^{1/2} (x+jx)\right] + \hat{\theta}_{n-} \exp\left[+\left(\frac{\pi\rho c}{P\lambda}\right)^{1/2} (x+jx)\right] \quad (13)$$

(13) nolu eşitlik biraz daha farklı bir yaklaşımla ISO 13786’da da kullanılmıştır. ISO 13786’da açıklanan hesap metodu ile ilgili olarak kapsamlı açıklamalar, Bölüm 4’de verilmiştir.

4. YAZ KONFORU VE TS EN ISO 13786

Daha önce de belirtildiği üzere, yaz konforu için kararlı rejim şartlarının kullanılması, bu mevsimde yapı elemanlarını büyük ölçüde etkileyen güneş ışınlarının yoğun enerjisi ve bu enerjinin 24 saatlik periyotlarla değişmesi sebebiyle mümkün değildir. Yaz şartları ile ilgili hesaplamalarda TS EN ISO 13786 kullanılmaktadır. Bu Standard ISO 13786'nın tercümesidir. Bu standardda açıklanan hesap metodu binanın tümünün ısı performansını değerlendirmemekte, ancak yapı elemanlarının ısı özelliklerinin belirlenmesini ve bu elemanların ayırdığı iç ve dış ortamlardaki sıcaklık ve ısı akısının sinüzoidal değişiminin belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

ISO 13786'ya göre bir elemanın periyodik rejim şartlarında performansını değerlendirebilmek için, periyodik nüfuziyet (penetrasyon) derinliğinden hareketle elemanın iletim (aktarım) matrisleri, periyodik ısı geçirgenliği, ısı kabul değeri, ısı kapasitesi, azaltma faktörü ve zaman ötelenmeleri hesaplanmaktadır.

Periyodik rejim hesaplarında en önemli büyüklük iletim matrisidir. Bir elemanın iletim matrisinin bilinmesi halinde, elemanın bir yüzeyinde (veya ayırdığı ortamlardan birinde) sıcaklık ve ısı akısının karmaşık genliklerinin bilinmesi ile, diğer yüzeydeki (veya diğer ortamdaki) sıcaklık ve ısı akısının karmaşık genliklerinin hesaplanması mümkün olmaktadır. İletim matrisinin elemanlarından faydalanarak ise, bir yapı elemanının periyodik ısı özelliklerinin hesaplanması da mümkün olmaktadır. TS EN ISO 13786'da kullanılan kavramlar ve hesap metodu aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

4.1. TS EN ISO 13786'da Tanımlanan Kavramlar

Standardda geçen önemli tarifler aşağıda verilmiştir. Birimler ise Notasyon Listesi'nde görülmektedir.

- **Sinüzoidal koşullar (Sinusoidal conditions):** Sıcaklık ve ısı akısının uzun dönem ortalamalarının etrafındaki değişimlerinin, zamana bağlı sinüs fonksiyonu olarak tariflendiği şartlar. Karmaşık sayılar kullanılarak "n" bölgesindeki sıcaklık ve ısı akısı (14) ve (15) nolu eşitliklerle belirlenir.

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| \cos(\omega t + \psi) = \bar{\theta}_n + \frac{1}{2} [\hat{\theta}_{+n} e^{j\omega t} + \hat{\theta}_{-n} e^{-j\omega t}] \quad (14)$$

$$\phi_n(t) = \bar{\phi}_n + |\hat{\phi}_n| \cos(\omega t + \varphi) = \bar{\phi}_n + \frac{1}{2} [\hat{\phi}_{+n} e^{j\omega t} + \hat{\phi}_{-n} e^{-j\omega t}] \quad (15)$$

Burada

$\bar{\theta}_n$: sıcaklığın ortalama değerini (ortalama sıcaklık),

$\bar{\phi}_n$: ısı akısının ortalama değerini (ortalama ısı akısı),

$|\hat{\theta}_n|$: sıcaklık değişimlerinin genliğini,

$|\hat{\phi}_n|$: ısı akısı değişimlerinin genliğini,

ω : değişimlerin açısal frekansını,

$\hat{\theta}_{\pm n}$ ve $\hat{\phi}_{\pm n}$: karmaşık genlikleri

ifade ederler. Karmaşık genlikler (16) nolu eşitlikler kullanılarak hesaplanır:

$$\hat{\theta}_{\pm n} = |\hat{\theta}_n| e^{\pm j\psi} \text{ ve } \hat{\phi}_{\pm n} = |\hat{\phi}_n| e^{\pm j\varphi} \quad (16)$$

- **Periyodik ısı iletkenlik (Periodic thermal conductance, L_{mn}):** Sinüzoidal koşullar altında (17) nolu eşitlikte tanımlanan karmaşık sayıdır. Bir anlamda kararlı rejim şartları için TS 825'de verilen (alan x ısı geçirgenlik) (AxU değeri)'nin periyodik rejim şartlarındaki karşılığı olarak düşünülebilir.

$$\hat{\phi}_m = -\sum_n L_{mn} \cdot \hat{\theta}_n \quad (17)$$

Burada “m” ve “n” bölgeleri aynı veya farklı olabilir.

- Toplam ısı kapasitesi (Heat capacity, C_m): Elemanın bir tarafına ait periyodik ısı iletkenliğin tersinin sanal kısmının tersi alındıktan sonra açılal frekansa bölünmesi ile elde edilen büyüklüktür (Eşitlik (18)).

$$C_m = \frac{1}{\omega \Im \left(\frac{1}{L_{mm}} \right)} = \frac{T}{2 \pi \Im \left(\frac{\hat{\theta}_m}{\hat{\phi}_m} \right)} \quad (18)$$

- Zaman ötelenmesi=Faz kayması (Time shift, Δt): Sebepin maksimum genliğı ile sonucun maksimum genliğı arasındaki zaman farkıdır.

Yukarıdaki tarifler bütün şartlar için geçerlidir. Sadece tek boyutlu ısı akışı için geçerli tarifler ise aşağıda gösterilmiştir.

- Isıl kabul (Thermal admittance, Y_{mn}) ve periyodik ısı geçirgenlik (Periodic thermal transmittance, Y_{mn}): “m” bölgesine komşu bileşenin yüzeyi boyunca gerçekleşen ısı akısı yoğunluğunun karmaşık genliğinin, “n” bölgesindeki sıcaklığın karmaşık genliğine bölümü olarak tariflenen karmaşık büyüklüktür. Isı akısı, bileşenin yüzeyine girdiğı zaman pozitif kabul edilir. Aynı yüzey için hesaplandığında ısı kabul, farklı yüzeyler için hesaplandığında periyodik ısı geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 19). Periyodik ısı geçirgenlik, bir anlamda kararlı rejim şartları için TS 825’de verilen ısı geçirgenlik (U değeri)’nin periyodik rejim şartlarındaki karşılığı olarak düşünülebilir.

$$Y_{mn} = \frac{L_{mn}}{A} = - \frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_n} \quad (19)$$

Y_{mn} : Isıl kabul

Y_{mn} ($m \neq n$) : Periyodik ısı geçirgenlik, $\frac{\hat{\phi}_m}{A} = \hat{q}_m$

- Alanlal ısı kapasitesi (Areaic heat capacity, χ_m): Toplam ısı kapasitesinin, elemanın alanına bölünmesi ile elde edilir ve (20) nolu eşitlik ile hesaplanır.

$$\chi_m = \frac{C_m}{A} = \frac{1}{\omega \Im \left(\frac{1}{Y_{mm}} \right)} = \frac{T}{2 \pi \Im \left(\frac{\hat{\theta}_m}{\hat{q}_m} \right)} \quad (20)$$

İki bölgeyi ayıran bir bileşen için iki tane ısı kabul ve ısı kapasite vardır. Bunlardan biri elemanın bir bölgeyi ayıran yüzüne, diğeri diğeri bölgeyi ayıran yüzüne aittir ve hepsi ısı değişimlerin periyoduna bağlıdır.

- Azaltma faktörü (Decrement factor, f): Periyodik ısı iletkenliğin, kararlı rejim şartlarındaki ısı iletkenliğe (U) oranıdır ve (21) nolu eşitlik ile hesaplanır. Bazı yayınlarda “decrement factor” ifadesinin sönüm oranı yerine kullanıldığı görülmektedir. Ancak “decrement factor”, sıcaklık genliklerinin oranı ile hesaplanan sönüm oranından farklıdır; periyodik ısı iletkenliğin sabit sıcaklık şartlarındaki ısı geçirgenliğe oranıdır.

$$f = \frac{|\hat{q}_m|}{|\hat{\theta}_n| U} = \frac{|L_{mn}|}{AU}, \quad m \neq n \quad \text{ile} \quad (21)$$

- Periyodik nüfuziyet derinliğı (Periodic penetration depth, δ): Yüzeyinde sinüzoidal sıcaklık değişimlerinin etkili olduğı sonlu kalınlıktaki homojen bir malzemede sıcaklık değişimlerinin genliğinin, “e” faktörü ile azaldığı derinliktir ve (22) nolu eşitlik ile hesaplanır.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda P}{\pi \rho c}} \quad (22)$$

- **Isı iletim (aktarım) matrisi (Heat transfer matrix):** Bir bileşenin bir tarafındaki sıcaklık ve ısı akısının karmaşık genliği ile diğer taraftaki sıcaklık ve ısı akısı karmaşık genliği arasındaki bağıntıyı sağlayan matristir.

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

“2 yüzeyinin karmaşık genliklerinin matrisi” “İletim matrisi” “1 yüzeyinin karmaşık genliklerinin matrisi”

İletim matrisinin elemanlarının (modül ve argümanlarının) fiziksel anlamları aşağıda açıklanmıştır.

$|Z_{11}|$ → Sıcaklık genlik faktörü, birinci taraftaki 1 K’lik genliğe sahip periyodik sıcaklık değişimi sonucu ikinci taraftaki sıcaklık değişimlerinin genliğidir.

φ_{11} → Bileşenin iki tarafındaki sıcaklıklar arasındaki faz farkıdır.

$|Z_{21}|$ → Birinci taraftaki 1 K’lik genliğe sahip periyodik sıcaklık değişimi sonucu ikinci taraftan geçen ısı akısı genliğidir.

φ_{21} → İkinci taraftan geçen ısı akısı ile birinci taraftaki sıcaklık arasındaki faz farkıdır.

$|Z_{12}|$ → Birinci taraftaki 1 W/m² genliğindeki periyodik ısı akısı değişimi sonucu ikinci taraftaki sıcaklık değişimlerinin genliğidir.

φ_{12} → Birinci taraftan geçen ısı akısı ile ikinci taraftaki sıcaklık arasındaki faz farkıdır.

$|Z_{22}|$ → Isı akısı genlik faktörü, birinci taraftan geçen 1 W/m²’lik genliğe sahip ısı akısı değişimi sonucu ikinci taraftan geçen ısı akısı değişiminin genliğidir.

φ_{22} → Bileşenin her iki tarafından geçen ısı akısı arasındaki faz farkıdır.

4.2. Çok Tabakalı Elemanın İletim Matrisinin Hesaplanması (Transfer Matrix of a Multi-Layer Component)

Çok tabakalı elemanların iletim matrisinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$\xi = \frac{d}{\delta} \quad (24)$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (25)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \left\{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \right\} \quad (26)$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \left\{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \right\} \quad (27)$$

Çok katmanlı elemanda eğer sürekli bir hava boşluğu (düzlemsel hava boşluğu) varsa; düzlemsel hava boşluklarının aktarma matrisi oluşturulurken, hava tabakasının özgül ısı kapasitesi ihmal edilir. Böylece R_a değeri, eğer hava tabakasının konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyonla ısı iletimine gösterdiği toplam direnci ifade ediyorsa, düzlemsel hava boşluğu tabakasının iletim matrisi aşağıdaki şekilde oluşturulur. R_a değeri, EN ISO 6946’ya göre hesaplanır [20].

$$Z_a = \begin{pmatrix} 1 & -R_a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Çok katmanlı yapı elemanının, yüzeyden yüzeye iletim matrisinin oluşturulması için kullanılması gereken eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_N \cdot Z_{N-1} \cdots Z_3 \cdot Z_2 \cdot Z_1 \quad (29)$$

Burada, $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ çok katmanlı yapı elemanının, çeşitli katmanlarının birinci katmandan başlayarak numaralandırılmış matrisleridir. Birinci tabaka en iç tabakayı göstermektedir.

Çok katmanlı yapı elemanının ortamdaki iletim matrisi (30) nolu eşitlikte verilmiştir.

$$Z_{oo} = Z_{S2} \cdot Z \cdot Z_{S1} \quad (30)$$

Burada, Z_{S2} ve Z_{S1} sınır tabakalarının (iç ve dış yüzey film -hareketsiz hava- tabakası) aktarma matrisleridir. Bu büyüklükler, (31) nolu eşitliğe uygun olarak belirlenir.

$$Z_S = \begin{pmatrix} 1 & -R_S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

R_S ; yüzeye fiziksel olarak bağlı hareketsiz hava tabakasının konveksiyon ve radyasyonla ısı iletimine gösterdiği dirençlerin toplamıdır; sınır tabakasının yüzey direnci olarak da ifade edilir.

Standardda belirtilmemekle birlikte, [7, 11, 14] numaralı kaynakların incelenmesinden, iç veya dış taraftaki büyüklüklerin aranmasına göre çarpım sırasının aşağıdaki gibi olmasının uygun olacağı [16] nolu kaynakta belirtilmiştir.

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_d \\ \hat{q}_d \end{pmatrix} = \underbrace{Z_{sdış} \cdot Z_n \cdot Z_{n-1} \cdots Z_1 \cdot Z_{siç}}_{Z_{oo}} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{q}_i \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{q}_i \end{pmatrix} = Z_{oo}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_d \\ \hat{q}_d \end{pmatrix} \quad (32)$$

Elemanın ısı davranışlarının incelenmesi için periyodik ısı karakteristiklerin hesaplanması ile ilgili açıklamalar Bölüm 4.3’de verilmiştir.

4.3. Periyodik Isıl Karakteristiklerin (Özelliklerin) Hesabı

Daha önce de belirtildiği gibi, bir elemanın ısı davranışının incelenmesi için, periyodik ısı özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Herhangi bir bileşen için periyodik ısı özellikler, periyodik ısı geçirgenlik “ Y_{mn} ” veya periyodik ısı iletkenlik “ L_{mn} ” ve toplam ısı kapasitesi “ C_m ” dir. Alansal ısı kapasitesi “ χ_m ” de elemanın davranışını ifade eden bir büyüklük olmaktadır. Sınır tabakaların iletim matrisleri, ısı kapasitelerinin hesaplanmasında dikkate alınmaz.

ISO 13786’da düzlemsel ve homojen tabakalardan oluşmuş bileşenler için Y_{mn} ’lerin nasıl hesaplanacağı tarifli değildir. Bunun yerine Y_{mm} ve Y_{nn} ısı kabul değerlerinin hesap formülleri (33) nolu eşitlikte görüldüğü şekilde verilmiştir.

$$Y_{11} = \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \quad \text{ve} \quad Y_{22} = \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \quad (33)$$

Y_{mm} değerlerinin hesabı sırasında yapılan farklı kabuller vardır. Birincisinde yüzeyin adyabatik olduğu ($\hat{q}_m = 0$ veya $\hat{q}_n = 0$) kabul edilir ki bu durum iç bölme elemanlarını temsil eder [11]. Diğerinde yüzeyde sıcaklığın izotermal olduğu ($\hat{\theta}_m = 0$ veya $\hat{\theta}_n = 0$) kabul edilir ki bu durum da dış kabuk elemanlarını temsil eder [11]. Son olarak da $\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_2$ kabulü yapılabilmektedir. Standardda verilen (33) nolu eşitlik $\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_2$ için geçerlidir. $\hat{\theta}_2 = 0$ veya $\hat{\theta}_1 = 0$ olması durumunda;

$$Y_{11} = \left[\frac{\hat{q}_1}{\hat{\theta}_1} \right]_{\hat{\theta}_2=0} = \frac{Z_{11}}{Z_{12}}, \quad Y_{22} = \left[\frac{\hat{q}_2}{\hat{\theta}_2} \right]_{\hat{\theta}_1=0} = \frac{Z_{22}}{Z_{12}} \quad (34)$$

eşitlikleri geçerli olmaktadır [11].

Standard, açıklamalarında (33) nolu eşitliği tanımlarken; örnek çözümünde, (34) nolu eşitliklerle hesap yapmıştır.

Y_{mn} değerleri ise, [11] nolu yayına göre (35) eşitliğiyle hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} \hat{q}_m \\ \hat{\theta}_n \end{bmatrix}_{\hat{\theta}_m=0} = \begin{bmatrix} \hat{q}_n \\ \hat{\theta}_m \end{bmatrix}_{\hat{\theta}_n=0} = -\frac{1}{Z_{12}} \quad (35)$$

Periyodik ısı iletkenlik L_{mn} 'nin veya periyodik ısı geçirgenlik Y_{mn} 'nin zaman ötelenmesi (time lead), argümanın 0 ile π arasında değerlendirilmesi ile ISO 13786'ya göre (36) nolu eşitlikle hesaplanır.

$$\Delta t_Y = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{mn}) \quad (36)$$

Toplam ısı kapasiteleri, (37) ve (38) nolu eşitliklerle hesaplanır.

$$C_1 = A \frac{P}{2\pi \Im\left(\frac{Z_{12}}{Z_{11}-1}\right)} = \frac{A \cdot (\Re(Z_{11}) - 1)^2 + \Im(Z_{11})^2}{\omega \left((\Re(Z_{11}) - 1) \cdot \Im(Z_{12}) - \Re(Z_{12}) \cdot \Im(Z_{11}) \right)} \quad (37)$$

$$C_2 = A \frac{P}{2\pi \Im\left(\frac{Z_{12}}{Z_{22}-1}\right)} = \frac{A \cdot (\Re(Z_{22}) - 1)^2 + \Im(Z_{22})^2}{\omega \left((\Re(Z_{22}) - 1) \cdot \Im(Z_{12}) - \Re(Z_{12}) \cdot \Im(Z_{22}) \right)} \quad (38)$$

Burada \Re bir kompleks sayının gerçel (real) kısmını, \Im sanal (imajiner) kısmını göstermektedir.

Ancak ISO 13786'nın revizyonunda bu ifade (39) nolu eşitlikler şeklinde önerilmektedir ve daha anlamlı olmaktadır [21].

$$C_1 = A \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right|, \quad C_2 = A \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad (39)$$

Azaltma faktörü ise, (40) nolu eşitlikle hesaplanır:

$$f = \frac{1}{|Z_{12}| \cdot U} \quad (40)$$

Burada ısı iletkenlik U , sabit rejim şartlarındaki tek boyutlu ısı akımı için tanımlanan U değeridir ve EN ISO 6946'ya göre hesaplanır [20]. Azaltma faktörü, her zaman birden küçüktür. Ancak bu, iç ve dış ortam sıcaklık değişim genliklerinin oranlanması ile bulunan sönüm oranından farklı bir büyüklüktür.

Azaltma faktörünün zaman ötelenmesi (time lag - faz kayması), argümanın değeri 0, π aralığında değişecek şekilde, (41) nolu eşitlikle hesaplanır.

$$\Delta t_f = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{12}) \quad (41)$$

En genel anlamıyla zaman ötelenmesinin hesabı için (42) nolu eşitlik verilmektedir:

$$\Delta t_{ij} = \frac{T}{2\pi} \varphi_{ij} = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{ij}) \quad (42)$$

ISO 13786'da verilen dinamik ısı karakteristikler, [16] nolu kaynakta açıklanan dışarıdan yalıtım (DY) ve içerden yalıtım (İY) uygulamaları için Tablo I'de verilmiştir. Dinamik ısı karakteristiklerin değeri yalıtımın uygulama yerine göre değişim göstermektedir. Isıl kabul ve alansal ısı kapasite değerlerinde içerden yalıtım uygulamasında, dışarıdan yalıtım uygulamasına göre sırasıyla % 70 ve % 80 mertebelerinde bir azalma görülmektedir. Sıcaklık ve ısı akısı için zaman ötelenmelerinde ise içerden yalıtımın dışarıdan yalıtıma göre sırasıyla % 9 ve % 11 mertebelerinde daha yüksek değerler aldığı görülmektedir.

Tablo I.
ISO 13786 standardında açıklanan hesap metodunun iki farklı kesite uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar

Kesit kodu	Yalıtım kalınlığı	Zaman ötelenmesi		Isıl kabul	Alansal ısı kapasite	Azaltma faktörü	Isı geçirgenliği,
		Δt_{11}	Δt_{22}	Abs[Y ₁₁]	χ_1	f	U
	m	saat		W/m ² K	kJ/m ² K	-	W/m ² K
DY	0.03	8.42	7.99	4.34	128.16	0.41	0.75
İY	0.04	9.16	8.89	1.30	25.9	0.55	0.63

5. SONUÇ

Türkiye’de binaların ısı performans değerlendirmeleri sadece ısıtma amaçlı enerji tüketimini (kış konforu) azaltmak için yapılmaktadır ve bu konu ile ilgili TS 825 standardı bulunmaktadır. Bina bileşenlerinin yaz konforuna katkılarının değerlendirilmesi için mevcut olan Türk Standardı TS EN ISO 13786’dır. Bu Standard ISO 13786’nın tercümesidir. Ancak ülkemizde hiçbir binada bu standarda uygun değerlendirme yapıldığı tespit edilememiştir. Bu sonuç, TS EN ISO 13786’da açıklanan hesap metodunun mimar ve mühendislerin eğitimi sırasında anlatılmamış olmasının yanında, TS EN ISO 13786’daki açıklamaların yeterli anlaşılabilirlikte olmayışından da kaynaklanmaktadır.

Isıl konfor ile ilgili uygulamadaki genel yaklaşım, kış konforu açısından yeterli olan bir bina-nın yaz konforu açısından da yeterli olacağı doğrultusunda gelişmektedir. Hâlbuki kış ve yaz konforunu etkileyen malzeme ve eleman özelliklerinin farklılık gösterdiği bilinmektedir. Binaların tüm yıl boyunca ısı konfor sağlaması, tabiatıyla kış ve yaz konforunun birlikte düşünülmesiyle mümkündür. Binaların ısı konfor açısından yeterli olabilmesi için hem kış hem de yaz konforunun dikkate alınması ve her iki konfor açısından en uygun uygulamanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Malzeme özelliklerinin sönüm oranı ve faz kayması üzerine etkilerini inceleyen veya periyodik rejim şartlarını dikkate alarak, kısmi diferansiyel denklem için tek boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu sayısal veya analitik çözüm öneren çok sayıda ulusal ve uluslararası yayın mevcuttur. Bunlar değerli bilimsel çalışmalardır. Fakat uygulama açısından önemli olan birbirleriyle karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmektir ki; bunun için hesapların standartlarda belirtilen hesap metodu kullanılarak yapılması gerekir. Bu makalenin amacı, TS EN ISO 13786’da belirtilen metodun uygulamadaki mühendis ve mimarlar tarafından sık kullanılır hale gelmesine katkı sağlamaktır.

TS EN ISO 13786’da dinamik ısı özelliklerin hesaplanması için verilen metotla ilgili açıklamalar, bu metodun kullanımı sırasında ortaya çıkan sorulara yeterince açıklama getirebilecek kapsamda değildir. Standartdan farklı olarak, bu makaleyi okuyan kişilerin periyodik rejim şartlarındaki eleman davranışlarını ve ortamlardaki sıcaklık ve ısı akışı değişimlerini kolaylıkla hesaplayabilmelerinin mümkün olması ümit edilmektedir. Ülkemizde kullanılan çok sayıda farklı yapı elemanı kesitleri için gerçekleştirilen kapsamlı hesap sonuçlarının ise bu makaleyi takiben sunulması planlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

1. Anonim (1998) TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara
2. Dilmaç Ş. ve Kesen N. (2003) A Comparison of New Turkish Thermal Insulation Standard (TS 825), ISO 9164, EN 832 and German Regulation, *Energy and Buildings*, 35, 161-174.
3. Anonim (1989) ISO 9164-Thermal Insulation–Calculation of Space Heating Requirements for Residential Buildings, International Organization for Standardization, Switzerland.
4. Anonim (1998) EN 832-Thermal Performance of Buildings, Calculation of Energy Use for Heating, Residential Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
5. Antonopoulos K. A. ve Democritou F. (1993) Correlations for the Maximum Transient Non-Periodic Indoor Heat Flow Through 15 Typical Walls, *Energy*, 18, 705-715.
6. Anonim (1999) ISO 13786 Thermal Performans of Building Components-Dynamic Thermal Characteristics_Calculation Methods, International Organization for Standardization, Switzerland.

7. Anonim (2005) TS EN ISO 13786 Bina Bileşenlerinin Isıl Performansı–Dinamik Isıl Özellikler–Hesaplama Metotları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
8. Davies M. G. (1973) The Thermal Admittance of Layered Walls, *Building Science*, 8(21), 207-220.
9. Davies M. G. (1978) On the Basis of the Environmental Temperature Procedure, *Building and Environment*, 13, 29-46.
10. Davies M. G. (1983) Optimum Design of Resistance and Capacitance Elements in Modelling a Sinusoidally Excited Building Wall, *Building and Environment*, 18(1/2), 19-37.
11. Davies M. G. (1994) The Thermal Response of an Enclosure to Periodic Excitation: The CIBSE Approach, *Building and Environment*, 29(2), 217-235.
12. Davies M. G. (1995) Solutions to Fourier’s Equation and Unsteady Heat Flow Through Structures, *Building and Environment*, 30(3), 309-321.
13. Davies M. G. (1997) Wall Transient Heat Flow Using Time–Domain Analysis, *Building and Environment*, 32(5), 427-446.
14. Akander, J. (2000) The ORC Method-Effective Modelling of Thermal Performance of Multilayer Building Components, Doctoral Dissertation, Department of Building Sciences, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm.
15. Dilmaç, Ş., Yapıların Yalıtımı ve Korunumu, Ders Notları (Yayınlanmamış).
16. Cihan M. T. (2005) EPS-Bloklu, Çelik Donatılı Beton Taşıyıcı Duvarlı Binanın Isıl Performansı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
17. Colombo R., Landabaso A., Sevilla A. (1994) Passive Solar Architecture for Mediterranean Area-Design Handbook, Publication of CEC-DG XVII, Brussel.
18. Anonim (1997) TS PrEN 33786 Yapı Elemanlarının Isıl Performansı-Isıl Eylemsizlik Karakteristikleri Hesaplama Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
19. Yücesoy, L. (1984) *Yapılarda Isı ve Buhar Etkisi*, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi, İstanbul.
20. Anonim (1996) EN ISO 6946 Building Components and Building Elements–Thermal Resistance and Thermal Transmittance– Calculation Method, International Organization for Standardization, Switzerland.
21. Anonim (2004) ISO/DIS 13786 Thermal Performans of Building Components_Dynamic Thermal Characteristics-Calculation Methods, International Organization for Standardization, Switzerland.

Makale 13.10.2006 tarihinde alınmış, 25.05.2007 ve 25.02.2008 tarihlerinde düzeltilmiş, 06.03.2008 tarihinde kabul edilmiştir. İletişim Yazarı: M. T. Cihan (tcihan@corlu.edu.tr).