Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 22, Sayı 2, 872-880, 2018

Süleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Sciences
Volume 22, Issue 2, 872-880, 2018

DOI: 10.19113/sdufbed.07639

# Bina Duvarlarının Termofiziksel Özellikleri Arasındaki İlişkileri ile Bu Özelliklerin Dinamik Isıl Karakterlerine Etkilerinin Araştırılması

**Murtaza YILDIRIM[1], Hasan OKTAY[2], Recep YUMRUTAŞ*[3]**

[1]Gaziantep Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 27310, Gaziantep
[2]Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman
[3]Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep

(Alınış / Received: 28.02.2017, Kabul / Accepted: 16.11.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 22.01.2018)

**Anahtar Kelimeler**
Bina duvarları,
Beton,
Termofiziksel özellikler,
Zaman gecikmesi,
Sönüm oranı,
CFFT

**Özet:** Binaların ısıtılması ve soğutulması için tüketilen enerjinin artmasıyla birlikte ısıl performansı yüksek olan inşaat malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu malzemelerin ısıl performansı ise doğrudan termofiziksel özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Her ne kadar literatürde her bir termofiziksel özelliğin dinamik ısıl karakterleri olan; faz kayması (TL) ve sönüm oranına (DF) etkisi incelense de, bu özelliklerin birbiri arasındaki ilişkiler göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada ise; her bir termofiziksel özelliğin arasındaki ilişki deneysel yöntemler ile elde edilerek, bu özelliklerin DF ve TL üzerindeki etkileri gerçekçi olarak incelenmiştir. Bu yüzden farklı bileşimli 102 beton duvar numunesi üretilerek, termofiziksel özellikleri ASTM ve EN standartlarına göre ölçülmüş ve aralarındaki ilişkiler denklemlerle tanımlanmıştır. Termofiziksel özelliklerin yapıların ısıl karakterlere olan etkisini incelemek amacıyla, analitik çözüm kullanılarak MATLAB tabanlı bir bilgisayar program hazırlanmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Sonuç olarak, bu yapılan çalışma sayesinde herhangi bir termofiziksel özelliği belli olan bir bina duvar veya tavan malzemelerinin TL ve DF değerleri kolaylıkla bulunabilmektedir.

# Investigation of Relationships Between Thermophysical Properties of Building Walls and Their Effects on Dynamic Thermal Characteristics

**Keywords**
Building walls,
Concrete,
Thermophysical properties,
Time lag,
Decrement factor,
CFFT

**Abstract:** The growing concern about energy consumption of heating and cooling of buildings has led to a demand for improved thermal performances of building materials. Thermal performance of building structures strictly depend on thermophysical properties of the structures. Many investigations are presented in literature arguing to find the influence of each thermophysical property on time lag (TL) and decrement factor (DF) by keeping the other properties constant. In this context, the purpose of this study is to investigate the effect of each property on heat gain utilizing relationships between the measurement values of thermophysical properties of building materials. Therefore, 102 new concrete wall samples were produced, their thermophysical properties were tested in accordance with ASTM and EN standards, and expressions related between these properties are obtained. By using those expressions, TL and DF values for each building structure are computed from the solution of transient heat transfer problem by applying Complex Finite Fourier Transform (CFFT) technique. A program based on the solution in MATLAB is prepared, and the results are discussed. Consequently, if one of the thermophysical properties of a building wall or roof materials is known, TL and DF can be calculated easily.

## 1. Giriş

İnsanın konforlu bir şekilde yaşayabilmesi için, temel olarak yaşadığı ortamın sıcaklığı, nemi ve havanın temizliği konfor şartlarında olması gerekir. Bu şartların en önemlilerinden biri olan yaşanılan ortamın sıcaklığı; yapıyı çevreleyen duvar ve tavanlar ile çevre sıcaklığı, güneş ışınımı, rüzgar hızı gibi dış

*Sorumlu yazar: yumrutas@gantep.edu.tr

atmosferik şartlarla etkileşimi sonucu değişmektedir [1]. Değişen sıcaklığı konfor sıcaklığında tutulabilmesi, ortamın ısıtılması ya da soğutulması ile mümkündür. Yani; kışın dış hava sıcaklığı konfor sıcaklığından düşük olduğu için ortamın ısıtılması, yazın ise dış hava sıcaklığı konfor sıcaklığından yüksek ve güneş ışınımı kışa göre yüksek olduğu için ortamın soğutularak, konfor sıcaklığına düşürülmesi gerekmektedir. Bu durumda, yaz aylarında yaşanılacak yerlerin konfor sıcaklığına düşürülmesi ise soğutma üniteleriyle mümkündür. Bir soğutma ünitesinin kapasitesinin belirlenmesi ise, o yerin soğutma yükünün hesaplanmasına bağlıdır. Güneş ışınımı zamanla sürekli olarak değiştiğinden soğutma yükünün hassas bir şekilde hesaplanması oldukça karmaşık ve zaman alıcı görülmektedir. Aynı zamanda soğutma yükünü oluşturan bileşenler de oldukça fazladır. Bu bileşenler ise duvar, tavan, zemin, kapı ve pencerelerden, hava sızıntılarından, aydınlatma ve diğer elektrikli cihazlardan, insanlardan gelen ısı kazanımları olarak sayılabilir [2-5]. Bu bileşenlerden duvar ve tavandan gelen ısı kazançları soğutma yükünün en büyük kısmını oluşturmaktadır. Diğer bileşenler oran olarak daha az olup, bilinen yöntemlerle hesaplanmaktadır.

Faz kayması (TL) ve sönüm oranı (DF), bina yapılarının ısı kayıp ve kazanç büyüklüğünü gösteren iki önemli parametredir. Bir sıcaklık dalgasının, yapının dış yüzeyinden iç yüzeyine ulaşana kadar geçen zaman, yani eşdeğer dış-sıcaklığın en yüksek olduğu zaman ile iç yüzey sıcaklığının en yüksek olduğu zaman arasındaki fark faz kayması olarak bilinmektedir. İç yüzey sıcaklığının genliğinin eşdeğer dış sıcaklığın genliğine oranı da sönüm oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu iki özellik, yapıların ısıl depolama kapasitelerini hesaplamak için çok önemli karakteristiklerdir [6]. Bina soğutma yükünün en büyük bileşenini oluşturan duvar ve tavanların ısıl performanslarının arttırılması, bu yapıların uygun faz kayması ve sönüm oranları ile doğrudan ilişkili olup bu parametreler büyük oranda yapı malzemesinin kendi termofiziksel özellikleri olan yoğunluk, ısıl iletkenlik, kalınlık, özgül ısı ve ısı yayılım katsayısı değerlerine bağlıdır [7]. Bu özellikler ise bu yapıyı oluşturan malzemelerin mikro yapılarına, mineralojik bileşimlerine, oranlarına, içerdiği malzemelere, nem içeriğine ve boşluk yapısına bağlıdır [8]. Enerjinin daha verimli kullanılabilmesi için, uygun termofiziksel özelliklere sahip bina malzemelerinin kullanılması, ayrıca binaların ısıtılması ve soğutulmasında kullanılan ısıtma ve soğutma sistemlerinin kapasitelerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir.

Literatürde, binalarda kullanılan farklı duvar tiplerinin faz kayması ve sönüm oranlarının hesaplanması ve bazı termofiziksel parametrelerin faz kayması ve sönüm oranları üzerinde etkisinin araştırılması konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Dilmaç ve Eğrican [9] mekanlarda ısıl konforun sağlanması ve ısı yüklerinin karşılanmasında farklı malzemelerden yapılan duvar tiplerinin termofiziksel özelliklerinin etkilerini, konfor koşullarının sağlanmasında etkili olan faz kayması ve sönüm oranı ile ısı depolama özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Eğrican ve Onbaşıoğlu [10] duvar yüzeyine gelen güneş ışınımının sinüzoidal değişim gösterdiğini varsayarak; homojen yapıdaki bir duvarın ısı depolama kapasitesini, dört farklı malzeme için maksimum ısı depolama kapasitesini sağlayacak duvar kalınlıklarını araştırmışlardır. Bu duvarların her biri için, zaman ve kalınlığın fonksiyonu olarak sıcaklık ve ısı akısı değişimlerini elde etmişlerdir. Asan ve Sancaktar [11] çalışmalarında yapı elemanlarında faz kayması ve sönüm oranı üzerine termofiziksel özelliklerin ve kalınlığın etkilerini incelemişlerdir. Asan [12] yalıtım kalınlığının ve duvardaki konumunun faz kayması ve sönüm oranı üzerine etkisini sayısal olarak incelemiş, yalıtım kalınlığı ve konumunun bu parametreler üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Ülgen [13] güneş ışınımının etkisi altında farklı duvar tiplerinin ısıl tepkilerini teorik ve deneysel olarak araştırmıştır. Bir başka çalışmada ise [14] enerji verimli binalar için yapıların ideal termofiziksel özellikleri ve arasındaki ilişkiler tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda belirtilen birçok çalışmada genel olarak kullanılan termofiziksel özellikler sabit kabul edilmekte, birbirleri arasındaki ilişkiler dikkate alınmamakta ve irdelenmemektedir. Fakat malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi konusunda yapılan birçok çalışmada bu özelliklerin aralarında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya konulmakta, bu ise yapıların ısıl performanslarının incelenmesinde yanlış tanımlamalara yol açmaktadır [15-18].

Bu çalışmada termofiziksel özelliklerin birbirleri arasındaki ilişkiler dikkate alınmıştır. Kaynak [15] ile verdiğimiz çalışmada 102 beton duvar numunesi üretilerek, termofiziksel özellikleri ASTM ve EN standartlarına göre ölçülmüş ve aralarındaki ilişkiler denklemlerle ifade edilmiştir. Bu çalışmada ise; termofiziksel özelliklerin bina duvar yapılarının TL ve DF değerlerine olan etkisini incelemek amacıyla geçici rejim ısı transferi probleminin çözümünü kullanan MATLAB tabanlı bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Dış duvarlar için geçici rejim ısı transferi problemi ise Karmaşık Sonlu Fourier Dönüşümü (Complex Finite Fourier Transform, CFFT) tekniği uygulanarak çözülmüş, faz kayması ve sönümle oranı değerlerinin değişimleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle sunulmuş ve tartışılmıştır.

## 2. Problemin Formülasyonu

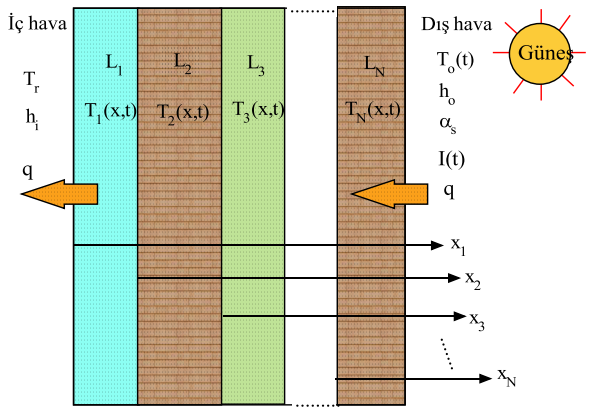
Bir duvardan geçen ısı; duvarı oluşturan katmanların kalınlıkları, ısı iletim katsayıları, yoğunluk ve özgül ısı katsayısı, duvarın iç ve dış ortam sıcaklıkları, iç ve dış yüzey sıcaklıkları, ısı taşınım katsayıları ile duvarın dış yüzeyine gelen güneş ışınımlarının

fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Eğer duvarın iç yüzey sıcaklığı bilinirse, duvar iç yüzeyinden odaya geçen ısı miktarı ısı taşınım katsayısı ve oda sıcaklığı kullanılarak hesaplanabilir. Bu yüzden, bu kısımda duvar iç ve dış yüzey sıcaklığı değerlerini hesaplayabilmek için analitik bir çözüm yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntemin ilk bölümünde çok katmanlı duvar için periyodik geçici rejim ısı transfer probleminin çözümü ana hatları ile verilmektedir. Bu çözümle duvarın iç ve dış yüzey sıcaklıkları saatlik olarak hesaplanacaktır. İkinci bölümde ise yatay yüzeye gelen saatlik güneş ışınım şiddeti kullanılarak istenen duvar yüzeyine düşen saatlik güneş ışınımı değerleri hesaplanacaktır. Faz kayması (TL) ve sönüm oranı (DF) değerlerinin elde edilmesi ise son bölümde verilmiştir.

### 2.1. Geçici rejimde ısı transferi probleminin çözümü

Bu bölümde, duvarlar için geçici rejimde ısı transferi probleminin periyodik çözümü verilmektedir. Duvarlar $L_n$ kalınlığında, $n$ katmandan oluşan çok katmanlı yapılardır. Çok katmanlı duvar yapıları şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Problemde ısı geçişinin tek yönlü ve zamanla değiştiği esas alınarak, aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

a) Her bir katmanın homojen ve ısıl özelliklerinin sabit olduğu varsayılmıştır.
b) Katmanlar arasında temas direnci ihmal edilmiştir.
c) Her bir katmanda herhangi bir ısı üretimi yoktur.
d) Isı taşınım katsayıları sabit alınmıştır.




**Şekil 1.** Çok katmanlı duvar yapılarının şematik gösterimi.

Bu varsayımlar altında, binanın iç ve dış yüzey sıcaklığının elde edilmesi için duvarlarda geçici rejimde ısı transfer probleminin çözülmesi gerekmektedir. Geçici rejimde periyodik ısı transferi problemi kısmi diferansiyel denklem, sınır ve periyodik şartlarla ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x_n^2}=\frac{1}{\alpha_n}\frac{\partial T_n}{\partial t} \quad 1\le n\le N \tag{1}$$

$$h_i(T_r-T_1)=-k_1\left.\frac{\partial T_1}{\partial x_1}\right|_{x_1=0} \tag{2}$$

$$-k_{n-1}\left.\frac{\partial T_{n-1}}{\partial x_{n-1}}\right|_{x_{n-1}=L_{n-1}}=-k_n\left.\frac{\partial T_n}{\partial x_n}\right|_{x_n=0} \quad 2\le n\le N \tag{3}$$

$$T(x_{n-1}=L_{n-1})=T(x_n=0) \quad 2\le n\le N \tag{4}$$

$$-k_N\left.\frac{\partial T_N}{\partial x_N}\right|_{x_N=L_N}=h_o\left[T_N-T_e(t)\right] \tag{5}$$

$$T_e(t)=T_o(t)+\frac{\alpha_s I_T(t)}{h_o}-\frac{\varepsilon\Delta R}{h_o} \quad x_N=L_N\text{'de} \tag{6}$$

(1) numaralı denklemde $\alpha_n=k_n/\rho_n c_n$, ısı yayılım katsayısını göstermektedir. Denklem 6' da $T_e$ ve $T_o$ sırasıyla saatlik güneş-hava ve dış hava sıcaklıklarını, $I_T$ güneş ışınımı şiddetini ve $\alpha_s$ ise güneş ışınımı yutma katsayısını göstermektedir. $\Delta R$ ise bir yüzeyden gökyüzü ve çevresine yansıyan uzun dalga ışınımı ile bir siyah cisim tarafından dış hava sıcaklığında yayılan ışınım arasındaki farktır. Yatay düzlemlerde bu değer 63 W/m$^2$ iken dikey yüzeylerde pratikte sıfır olarak kabul edilmektedir [2].

Denklem 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 içeren problemin formülasyonu boyutsuz değişkenlerle ve $T_n(x_n,t)=T_n(x_n,t+m)$ periyodik şartını ($m$ 24 saat olarak alınmıştır) sağlayarak boyutsuz forma dönüştürülmüştür. Daha sonra problemin boyutsuz formülasyona kompleks sonlu Fourier dönüşümü (CFFT) uygulanmıştır. Problemin çözümü aşağıdaki denklemlerle verilmiş olup, ayrıntılı çözümü ise Kaynak [19]'da bulunmaktadır. Denklem (1)-(6)'daki verilen çözümler CFFT'nin ters dönüşümü olarak yerine yazıldıktan sonra duvar içerisindeki saatlik sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

$$T_n(z_n,\tau)=\sum_{j=-M}^{M}T_{nj}(z_n)\,e^{i\omega_j\tau} \quad \omega_j=2\pi j \tag{7}$$

Burada $M$ terim sayısını göstermekte olup, 60 terim yeterli olmaktadır. Denklem (7) kullanılarak duvar iç ($T_1(z_1=0,\tau)$) ve dış yüzey ($T_N(z_N=1,\tau)$) sıcaklıkları sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_1(0,\tau)=\sum_{j=-M}^{M}T_{nj}(0)\,e^{i\omega_j\tau} \quad \omega_j=2\pi j \tag{8}$$

$$T_N(1,\tau)=\sum_{j=-M}^{M}T_{nj}(1)\,e^{i\omega_j\tau} \quad \omega_j=2\pi j \tag{9}$$

burada $\tau$ boyutsuz zamanı ve $\omega_j$ periyodik frekansı simgelemektedir.

### 2.2. Dış duvar yüzeyine gelen saatlik güneş ışınım

Duvar yüzeylerine gelen güneş ışınımı duvardan geçen ısı akısına etki eden çok önemli bir parametredir. Güneş ışınımı; bir duvardan geçen ısı akısını hesaplarken esas alındığı için, bu değeri doğru bulmak oldukça önemlidir. Bu nedenle, duvar yüzeyine gelen saatlik toplam güneş ışınımı, $I_T$ değerlerini hesaplamak için Gaziantep'teki yerel meteoroloji istasyonu tarafından ölçülen yatay yüzeye gelen saatlik ışınım değerleri kullanılmıştır. Eğik bir yüzeye gelen saatlik toplam güneş ışınımı $I_T$; doğrusal ışınım $I_{bT}$, yaygın ışınımı $I_{dT}$ ve yansıtılan ışınımın $I_{rT}$ toplamından oluşmaktadır.

$$I_T(t) = I_{bT}(t) + I_{dT}(t) + I_{rT}(t) \qquad (10)$$

Çalışmamızda kullanılan ışınım tahminlemede modeli olarak izotropik gökyüzü modeli kullanılmış olup, bu model denklemi Duffie ve Beckman [19]'da aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$I_T(t) = I_b(t)R_b + I_d(t)\frac{1+\cos\beta}{2} + \rho_g I(t)\frac{1-\cos\beta}{2} \qquad (11)$$

Bu formüldeki $\rho_g$ yeryüzü yansıma katsayısı olup, hesaplamalarda 0.2 olarak alınmıştır. $R_b$ doğrudan güneş ışınımı eğim faktörü olup, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [20].

$$R_b = \frac{\cos\theta_z\cos\beta + \sin\theta_z\sin\beta\cos(\gamma_s - \gamma)}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta} \qquad (12)$$

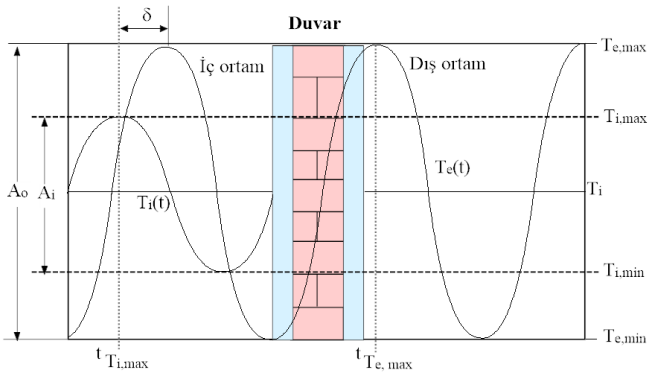
Burada $\theta_z$, $\phi$, $\omega$, $\gamma_s$, $\gamma$, $\beta$ ve $\delta$ sırasıyla; zenit, enlem, saat, güneş azimut, yüzey azimut, eğim ve sapma açılarıdır. Saat açısı $\omega$, dünyanın kendi eksenindeki dönüşüne göre güneşin doğu ya da batı yerel meridyendeki açısal yer değiştirmesini belirler. Bu saat açısı ortalama 15° sabah negatif, öğleden sonra ise pozitif değer alır. Sapma açısı $\delta$ güneşin ekvatora göre tam öğle vaktindeki açısal konumu olup kuzey yarım küre için pozitif alınır.

### 2.3. Faz kayması ve sönüm oranı

Güneş enerjisine maruz kalan bir yapının içerisindeki sıcaklık dağılımı, zamana bağlı olarak, duvarda kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerine göre, sinüzoidal bir fonksiyon olarak değişmektedir. Sıcaklık dalgasının duvar içindeki genliği, malzemenin termofiziksel özelliğine bağlı olarak azalmakta ve duvarın iç yüzeyine başlangıçtan oldukça küçülmüş olarak belli bir zaman gecikmesi ile ulaşmaktadır. Faz kayması (zaman gecikmesi); gün boyunca güneş-hava sıcaklığının ulaştığı en yüksek sıcaklık anı ($t_{Te,max}$) ile duvar iç yüzeyinin ulaştığı en yüksek sıcaklık anı ($t_{Ti,max}$) arasındaki süre olarak tanımlanmaktadır. Sönüm oranı ise; gün boyunca duvar iç yüzeyindeki en yüksek ($T_{i,max}$) ve en düşük ($T_{i,min}$) sıcaklık farkının güneş-hava sıcaklığının en yüksek ($T_{e,max}$) ve en düşük ($T_{e,min}$) sıcaklık farklarının oranı olarak tanımlanmıştır. Faz kayması ve sönüm oranı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiş olup, (13) ve (14) numaralı denklemler kullanılarak elde edilmiştir.

$$TL = t_{T_{i,max}} - t_{T_{e,max}} \qquad (13)$$

$$DF = \frac{A_i}{A_e} = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_{e,max} - T_{e,min}} \qquad (14)$$




**Şekil 2.** Faz kayması ve sönüm oranının şematik gösterimi

### 3. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada termofiziksel özelliklerin birbirleri arasındaki ilişkilerini tespit etmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bina yapılarında kullanılan farklı agrega ve katkı maddeleri kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin termofiziksel özellikleri çok geniş aralıkta olup, hem yapısal hem de hafif uygulamalarda kullanılan malzemelerin özelliklerini kapsamaktadır. Bu amaçla farklı karışım tiplerine sahip, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında hafif agrega ve katkı maddeleri kullanılarak; toplamda 102 adet olmak üzere normal beton (NB), hava sürüklenmiş beton (HSB), pomza betonu (PB), genleşmiş perlit betonu (GPB) ve lastik betonu (LB) üretilmiştir. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelikleri ve ayrıca numunelerin hazırlanması Kaynak [15]'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Üretilen numunelerin; basma dayanımı (MPa), yoğunluk (kg/m$^3$), gözeneklilik (%), su emme kapasitesi (%) gibi mekanik özellikleri ASTM standartlarına uygun olarak tespit edilmiştir (ASTM C39, C138 ve C948). Düğer taraftan ısı iletkenlik (W/m K), özgül ısı (J/kg K) ve ısı yayılım katsayısı (mm$^2$/s) gibi ısıl özellikleri EN 12667'ye göre numunenin hazırlanmasından 35 gün sonra hava ile kurutulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler Şekil 3'te gösterilen ısıl sabitler cihaz ile gerçekleştirilmiş olup, ölçümlerde Geçici Düzlem Kaynağı (TPS) tekniği kullanılmıştır. TPS tekniğinde ısı kaynağı, örneklerde sıcaklık artışını sağlayan ve bir algılayıcı görevi gören iki yönlü spiralden yapılmış sıcak bir disktir. Diğer ölçüm yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu yöntemin en büyük avantajı, tek bir hızlı ölçüm içinde termofiziksel özelliklerin tamamını bir bütün olarak tespit etmesidir. Malzemelerin deney sonuçlarından

elde edilen yoğunluk, özgül ısı, ısıl kapasite, ısıl iletkenlik ve ısıl yayılım katsayıları Tablo 1'de verilmiştir. Daha sonra malzemelerin termofiziksel özellikleri arasındaki ilişiklerin tespit edilmesi için testlerden elde edilen sonuçlar çok yönlü regresyon analizine tabi tutulmuş ve her bir termofiziksel özellik yoğunluğa bağlı olarak aşağıdaki ifadelerde gösterilmiştir:

$$k = 0{,}0676e^{0{,}0015\rho} \quad (15)$$

$$c = 1427{,}1e^{-0{,}0003\rho} \quad (16)$$

$$\alpha = 0{,}0757e^{0{,}0012\rho} \quad (17)$$

Elde edilen varyasyonlar daha önceki çalışmalarda farklı bina malzemelerinden elde edilen varyasyonlar ile büyük oranda uyuşmaktadır [16-18]. Sonuç olarak deneysel çalışmalar, her bir termofiziksel özelliğin birbirine bağlı olduğu ve ısıl performans hesaplamalarında bu özelliklerin birbirinden bağımsız olarak kullanılmaması gerektiğini ortaya koymuştur.




**Şekil 3.** Üretilen numunelerin ısıl özelliklerinin tespitinde kullanılan cihaz

**Tablo 1.** Üretilen duvar beton numunelerinin termofiziksel özellikleri*

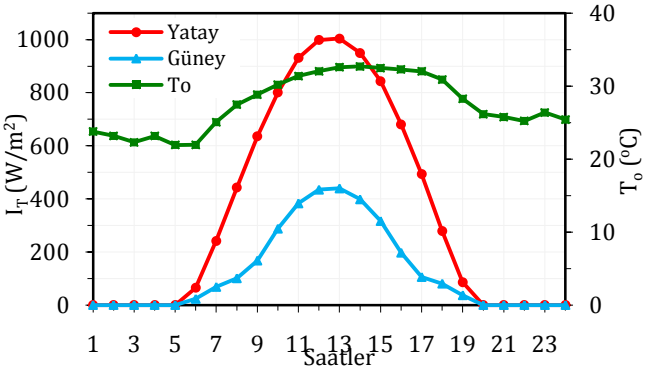
| Beton duvar tipi | Yoğunluk $\rho$ (kg/m$^3$) | Isıl iletkenlik $k$ (W/m K) | Özgül ısı $c$ (J/kg K) | Isıl kapasite $C$ (kJ/m$^3$ K) | Isı yayılım katsayısı $a$ (mm$^2$/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| NB | 2345,09 | 1,96 | 709,07 | 1662,83 | 1,18 |
| HSB | 2288,86 | 1,91 | 712,14 | 1630,00 | 1,17 |
| GPB10 | 2139,09 | 1,51 | 725,48 | 1551,87 | 0,97 |
| GPB20 | 1885,52 | 1,22 | 779,63 | 1470,01 | 0,83 |
| GPB30 | 1559,44 | 0,70 | 865,69 | 1350,00 | 0,52 |
| GPB40 | 1376,56 | 0,50 | 922,59 | 1270,00 | 0,40 |
| GPB50 | 1168,63 | 0,36 | 966,95 | 1130,00 | 0,32 |
| PB10 | 2005,34 | 1,54 | 772,42 | 1548,96 | 0,99 |
| PB20 | 1851,02 | 1,29 | 818,52 | 1515,11 | 0,85 |
| PB30 | 1559,95 | 0,76 | 903,87 | 1410,00 | 0,54 |
| PB40 | 1400,72 | 0,54 | 949,51 | 1330,00 | 0,41 |
| PB50 | 1329,97 | 0,41 | 991,80 | 1319,06 | 0,31 |
| LB10 | 2244,30 | 1,72 | 721,83 | 1620,00 | 1,06 |
| LB20 | 2148,07 | 1,44 | 737,70 | 1584,62 | 0,91 |
| LB30 | 2033,93 | 1,22 | 761,20 | 1548,22 | 0,79 |
| LB40 | 1874,62 | 0,89 | 808,93 | 1516,44 | 0,58 |
| LB50 | 1644,98 | 0,62 | 868,16 | 1428,11 | 0,43 |

*Bu değerler her bir testte altı numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

## 4. Hesaplama Yöntemi

Bu çalışmada bina duvarlarının faz kayması (TL) ve sönüm oranı (DF) değerlerinin sayısal hesaplamalarını yapmak için MATLAB tabanlı bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Bazı parametreler bu programa giriş parametreleri olarak kullanılmaktadır. Bu parametreler; meteoroloji istasyonlarından alınmış yatay bir yüzeye ait saatlik ışınım değerleri, kalınlık, yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik ve ısıl yayılım katsayıları, iç ve dış ortam ile duvar yüzeyleri arasındaki birleşik ısı taşınım katsayıları, saatlik dış hava sıcaklığı ve iç tasarım hava sıcaklığıdır. Programda ilk olarak, yüzeylere gelen güneş ışınımı Denklem 10, 11 ve 12'den hesaplanmıştır. Daha sonra dış yüzeye gelen güneş-hava sıcaklığı ve duvarın iç yüzey sıcaklığı sırasıyla Denklem 6 ve 8'deki periyodik çözümden bulunmuştur. Son olarak Denklem 13 ve 14'ten TL ve DF değerleri her bir duvar malzemesinin termofiziksel özelliklerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

İklim verileri faz kayması ve sönüm oranlarının hesaplanmasında en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, tasarım koşulları ve iklimsel verilerin bilinmesi gerekir. Oda iç hava tasarım sıcaklığı 24 ºC olarak alınmıştır. İç ve dış yüzeylerdeki birleşik ısı transfer katsayıları sırasıyla 8,3 ve 17 W/m$^2$ K olarak alınmıştır. Saatlik dış hava sıcaklıkları ile yatay yüzeye gelen güneş ışınımı değerleri 10 yıl boyunca (2003-2013) Gaziantep Meteoroloji istasyonu (enlem: 37,04 ˚K, boylam: 37,31 ˚D) tarafından 21 Temmuz'da ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerin ortalamaları alınarak, Şekil 4'te gösterildiği gibi, güney ve yatay duvar yüzeyine düşen güneş ışınımları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda güney yönüne bakan duvarların kullanılmasının sebebi, bu yöne bakan duvarların gün boyu güneş ışınımını almalarından dolayı en fazla ısı kazancı sağlayan duvarlar olmalarıdır. Ayrıca duvar renklerinin güneş ışınımının yutulması üzerinde önemli ölçüde etkindir. Bu çalışmada duvarlar koyu renkli olarak düşünülmüş ve duvarın güneş yutma katsayısı ($\alpha_s$) 0,884 olarak alınmıştır.

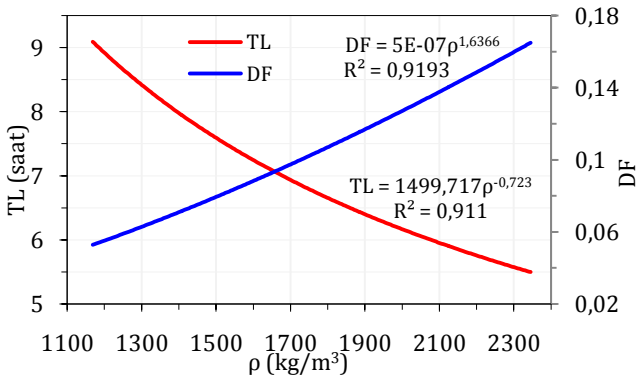



**Şekil 4.** Yatay ve Güney yüzeye bakan duvarlara gelen güneş ışınımı ve dış hava sıcaklığının günlük değişimi

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

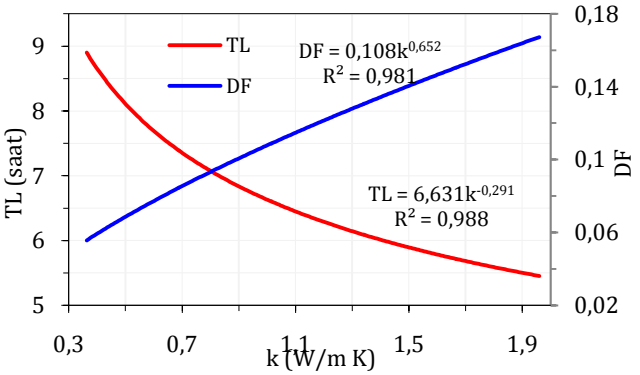
Bu çalışmada deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen duvar malzemelerinin termofiziksel özelliklerinin arasındaki ilişkileri kullanarak, her bir özelliğin duvarın faz kayması ve sönüm oranlarına olan etkisi incelenmiştir. Analizlerde genel olarak üç katmanlı 24 cm kalınlığındaki (2 cm sıva + 20 cm duvar + 2 cm sıva) güneye dönük duvarlar kullanılmıştır.

Şekil 5'te güneye dönük duvarlar için yoğunluğun TL ve DF değerlerine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilde 3'ten yoğunluk ile DF arasında pozitif kuvvetli bir ilişki ($R^2$=0,919) olduğu ve yoğunluk ile TL arasında negatif kuvvetli bir ilişki ($R^2$=0,911) olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluk arttıkça DF artmış ve TL değerinde azalma olmuştur. Bu durum Denklem 15 ve 17'de belirtildiği gibi yoğunluğun artması ile ısıl iletkenlik ve ısı yayılım katsayısının artmasından kaynaklanmaktadır. Buradan yoğunluğun ısıl performans üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu çıkarılmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki; seçilen tiplerdeki 24 cm kalınlığındaki duvar malzemelerinin yoğunluğundaki % 50,17'lik artış, TL değerlerinde % 56,50'lik bir düşüşe ve DF değerlerinde % 65.10'luk artışa sebep olmuştur. Buna karşın, Kontoleon vd. [20], IC tipi bir duvardaki yoğunluk değişiminin TL ve DF üzerindeki etkisini betonun ısıl iletkenliğini ($k_C$= 1 W/m °C) sabit alarak incelemişlerdir. Duvar malzemesinin yoğunluğunun diğer termofiziksel özelliklere olan ilişkisi bağımsız kabul edildiğinden betonun yoğunluğunun artması TL değerlerinin artmasına ve DF değerlerinin azalmasına sebebiyet vermiştir. Buna ek olarak bu çalışma sayesinde, bir duvar malzemesinin basit, kolay ve hızlı bir yöntem ile tayin edilen yoğunluğunun elde edilmesiyle bu tip duvarlara ait TL ve DF değerleri Şekil 3'deki denklem yardımıyla rahatlıkla hesaplanabilmektedir.




**Şekil 5.** Yoğunluğun faz kayması ve sönümleme oranı değerlerine olan etkisi

Seçilen duvar tipi için malzemelerin ısıl iletkenlik ile TL ve DF değişimleri, yoğunluk-DF ve yoğunluk-TL değişimine benzerlik göstermektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi duvar numunelerin ısıl iletkenlik ilişkileri üstel fonksiyonlar (TL için $R^2$=0,988 ve DF için $R^2$=0,981) olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, ısıl iletkenlik katsayısı duvardan geçen TL ve DF değerlerine güçlü bir etki etmekte ve ısıl iletkenlik arttıkça duvardan gelen TL azalmakta ve DF artmaktadır. Her ne kadar ısıl iletkenlik etkin bir özellik olsa da tek başına bina duvar ve tavanların ısıl dengesini tanımlamada yeterli değildir. Çalışma sonucunda, 0,363-1,96 W/m K arasında değişen ısıl iletkenlik değerlerinde DF değerlerindeki azalma miktarı % 65,42, TL değerlerindeki en yüksek fark 3,38 saat olarak elde edilmiştir.

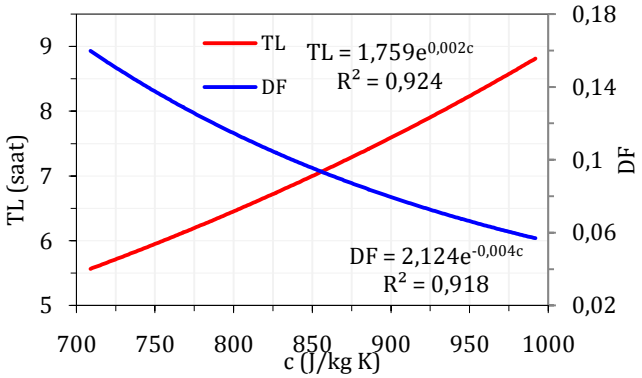



**Şekil 6.** Seçilen duvar tipinde ısıl iletkenliğin faz kayması ve sönümleme oranına etkisi

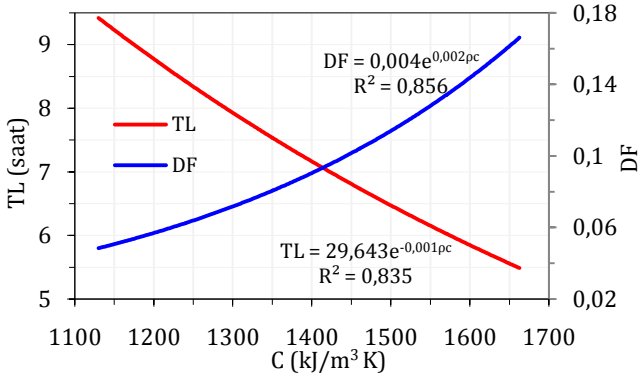
Özgül ısı, gelişen sıcaklık değişimlerinde bir malzemenin bu değişimlere karşı göstermiş olduğu kapasite özelliğidir. Özgül ısısı yüksek yapıların sıcaklık stabilizesi de yüksektir. Daha önceki çalışmamızdan [15] ve Denklem 16'da gösterildiği gibi özgül ısı ile malzemenin yoğunluğu arasında negatif kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiş olup, özgül ısı arttıkça yoğunluk azalmıştır. Şekil 7'de özgül ısı ile DF ve TL arasında üstel bir ilişki olduğu görülmüştür. Duvar malzemesinin özgül ısı değeri arttıkça DF değerleri azalmış ve TL değerleri artmıştır. Böylelikle daha önce yapılan tanımlamaya uygun olarak yapının sıcaklık stabilizesinin de arttığı görülmüştür. Buradan çıkarılacağı gibi, bir yapının özgül ısısı ne kadar yüksek olursa dışarıdan gelen toplam enerji bina yapıları tarafından yutularak sabit iç duvar sıcaklığına ulaşılmaktadır. Bu ise çok büyük ölçüde enerji sarfiyatını azaltmaktadır. Sonuçlarda gösterildiği gibi, özgül ısıda % 39,87'lik artma sırasıyla DF oranında % 65,45'lik azalmaya ve TL değerlerinde % 60,97 artmaya sebebiyet vermiştir. Binalarda yüksek özgül ısıya sahip malzemelerin kullanılmasıyla klima soğutma-ısıtma kapasitesi ve maliyeti ile birlikte enerji kaybı ve ısıtma-soğutma işletme giderleri azalacak, Ülkemiz ekonomisine büyük katkı sağlanacaktır.

Bina duvar ve tavan yapılarının ısı kapasitesi *C*, özgül ısı *c* (kJ/kg K) ile yoğunluğun $\rho$(kg/m$^3$) çarpımından hesaplanmaktadır. Şekil 8'de 24 cm'lik duvarlarda, malzemelerin ısı kapasitesi ile duvarların DF ve TL parametreleri arasındaki ilişki verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bu ilişki yoğunluk, ısıl iletkenlik gibi verilen diğer özellikler arasındaki ilişkilerden daha zayıftır (DF için $R^2$=0,856 ve TL için $R^2$=0,835). Kaynak [11] ve [22-24]'te yapılan çalışmalarda, malzemelerin ısı kapasitesi arttıkça DF değerlerinin

azaldığı ve TL değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Hatta en yüksek ısıl kapasite değerlerinde en düşük DF değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar her ne kadar teorik olarak doğru görünse de gerçek bir durumdan uzaktır. Oktay vd. [15] özgül ısı ile yoğunluk arasında negatif kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Tablo 1 incelendiğinde malzemelerin yoğunluğunun artması özgül ısının azalmasına sebebiyet vermesine rağmen, ısı kapasitesini arttırdığı gözlenmiştir. Bu sonuç, yoğunluktaki artışın özgül ısıdaki azalma oranından daha yüksek olduğunu göstermiştir. Buradan, artan duvar malzemesi yoğunluğunun ısı iletkenlik katsayısının artmasına neden olduğu açık bir biçimde anlaşılmaktadır. Bu yüzden ısı kapasitesi ile DF ve TL arasındaki ilişkilerin diğer özelliklere bakıldığında daha zayıf bir parametre olduğu görülmüştür. Örnek olarak, metaller yüksek yoğunluklarından dolayı ısı kapasiteleri yüksek, izolasyon malzemelerinin ise düşük yoğunluklarında dolayı ısı kapasiteleri çok düşüktür.

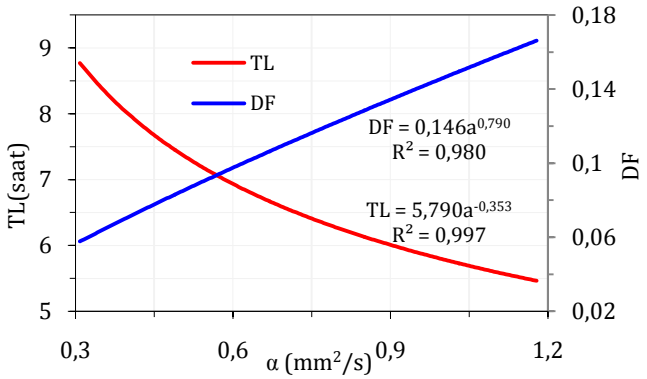



**Şekil 7.** Seçilen duvar tipinde özgül ısının faz kayması ve sönümleme oranına etkisi




**Şekil 8.** Seçilen duvar tipinde ısı kapasitesinin faz kayması ve sönümleme oranına etkisi

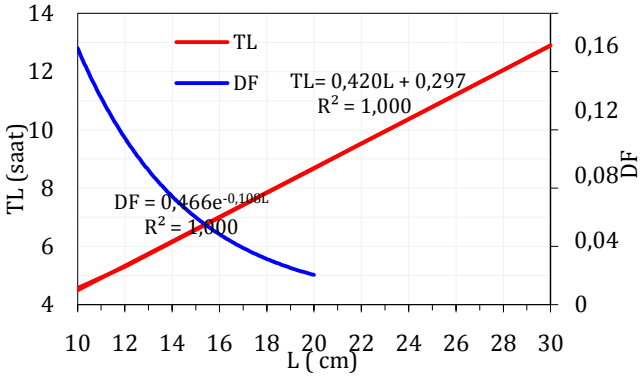
Isı yayılım fiziksel bir özellik olup, yüksek ısı yayılım katsayısına sahip olan malzemeler sıcaklık değişimlerine hızlı tepki vermekte, düşük ısı yayılım katsayısına sahip olan malzemeler kendilerine etki eden sıcaklık değişimlerine çok yavaş tepki vermektedir [18]. Denklem 17'de ısı yayılım katsayısı ile yoğunluk arasındaki ilişki verilmiştir. Bu ifadeden ısı yayılım ile yoğunluk arasında pozitif kuvvetli bir ilişki olduğu ve ayrıca önemli bir özellik olduğu görülmektedir. Aynı zamanda ısıl iletkenlik ile yoğunluk arasında da pozitif kuvvetli bir ilişki olduğundan, ısı yayılım katsayısı ile ısıl iletkenlik arasında da pozitif kuvvetli bir ilişki olduğu buradan çıkarılmaktadır. Fakat bu durum bazı malzemeler için istisnadır. Düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip izolasyon malzemelerinden olan köpüklerin, düşük yoğunlukları ile birlikte düşük ısı kapasitelerine de sahip olmalarından dolayı ısı yayılım katsayıları diğer malzemelere nazaran daha yüksek olmaktadır. Bu yüzden bina yapılarında kullanılacak olan malzemelerin yoğunluklarının çok düşük olması enerji sarfiyatı bakımından çok istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Binalarda düşük ısı yayılım katsayısına sahip beton duvar malzemelerinin kullanılması bu sarfiyatın önüne geçecektir. Beton duvarların ısı yayılım katsayılarının DF ve TL parametrelerine olan etkisi Şekil 9'da incelenmiştir. Bu grafikte gösterildiği gibi ısı yayılım katsayısı arttıkça DF değerleri artmış, TL değerleri ise azalmıştır. Sonuçlar ısı kapasite ve ısıl iletkenliğin bir fonksiyonu olan ısı yayılım katsayısının çok önemli bir parametre olunduğunu ($R^2 > 0,98$ hem TL ve DF için), duvar yüzeyinden gelen ısı akıları ve duvar üzerindeki sıcaklıkları kontrol ettiği ispatlamıştır. Sonuç olarak belirtilen duvar tiplerinde, ısı yayılım katsayısında % 73,87'lik artma TL değerlerinde % 60,97' lik düşüşe, DF değerlerinde % 65,45 'lik artışa neden olmuştur.




**Şekil 9.** Seçilen duvar tipinde ısı yayılım katsayısının faz kayması ve sönümleme oranına etkisi

Şekil 10'da aynı termofiziksel özelliklere sahip olan duvarlardaki kalınlığın DF ve TL üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, kalınlık (L) arttıkça DF ve TL değerlerinde düzgün olarak ($R^2$=1 hem TL ve DF için) bir azalma meydana gelmiştir. Hatta en yüksek duvar kalınlığında DF sıfıra yaklaşmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki; seçilen duvar tiplerinde kalınlığın 10 cm den 30 cm ye yükselmesi en yüksek DF oranında %88,39'luk bir düşüşe, TL değerlerinde ise 8,33 saatlik artışa neden olmuştur. Bu durum özellikle ağır yapıların yüksek ısı kapasitelerinden dolayı yüksek hava sıcaklıklarında bu yapıların ısıyı hapsetmeleri ve belli konveksiyon şartlarında tutulan yapının sürekli serin kalmasını sağlamaktadır [25]. Çalışmada, kaynak [11,22,23] ve [26]'daki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat pratik uygulamalarda, özellikle düşük maliyetin korunduğu konutlarda bu durum tercih edilebilir bir strateji değildir. Çünkü bu yapıların kalınlıklarının

belirli limitlerde olması gerekmektedir. Diğer yandan yurdumuzun büyük çoğunluğunun deprem riski taşıyan bölgelerde bulunması göz önüne alındığında, yapıların kalınlıklarının artması yapı ağırlığını ve yapıya etkiyen deprem yükünü arttıracak ve dolayısı ile depremlerdeki olası yapı hasarlarının meydana gelmesine sebebiyet verecektir. Sonuç olarak yukarıda bahsi geçen malzemelerin özellikle enerji depolama alanlarında kullanılması uygun görülmektedir.




**Şekil 10.** Seçilen duvar tipinde duvar kalınlığının faz kayması ve sönümleme oranına etkisi

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada termofiziksel özelliklerin bina dış duvarlarının ısıl performans parametreleri olan TL ve DF 'ye olan etkisini incelemek amacıyla geçici rejim ısı transferi problemin çözümünü kullanan MATLAB tabanlı bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program kullanılarak yapıların dinamik ısıl karakter göstergesi olan TL ve DF değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen en önemli bulgular ise aşağıda özetlenmiştir.

1. Literatürde verilen çalışmalarda malzemelerin termofiziksel özellikleri arasındaki ilişkiler ihmal edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ise, literatürde verilen birçok çalışmanın gerçekçi olmadığını ispatlamıştır.
2. Bu çalışmanın en yenilikçi tarafı ise, herhangi bir termofiziksel özelliği belli olan duvar yapılarının TL ve DF değerlerinin kolaylıkla elde edilebilmesidir.
3. Elde edilen sonuçlar ışığında yoğunluğun; ısıl iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım katsayısının termofiziksel özellikler arasında baskın bir yere sahip olduğu, ısıl kapasitenin ise bunlara nazaran daha zayıf olduğu tespit edilmiştir. Duvar malzemelerinin yoğunluk, ısıl iletkenlik ve ısı yayılım katsayısı değerleri arttıkça duvarın DF değerleri artmış, TL değerleri azalmış, özgül ısının artması ise DF değerlerini azaltmış ve TL değerlerini arttırmıştır.
4. Bina yapılarının ısıl kapasitelerinin artması literatürde belirtildiği gibi, yapının ısıl performans göstergeleri olan TL değerini arttırmamakta ve DF değerlerini tek başına azaltmamaktadır.
5. Malzemelerin kalınlığının TL ve DF değerleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olmasına rağmen, pratik uygulamalarda kalınlığın arttırılmasının pek doğru bir çözüm olmadığı belirtilmiştir.

## Kaynakça

[1] Dağsöz, A. K., Işıkel, K., Bayraktar, K. G. 1999. Yapılarda sıcak etkisinin getirdiği problemlerin ısı yalıtımı ile çözümü ve enerji tasarrufu, IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 329-339.

[2] ASHRAE, 1993. Handbook-fundamentals, Atlanta, ASHRAE.

[3] McQuiston, F. C., Parker, J. D. 1994. Heating, ventilating, and air conditioning, 4th ed, New York, Wiley.

[4] McQuistion, F. C., Spitler, J. D.. 1992. Cooling and heating load calculation manual, Second Edition, ASHRAE.

[5] [5] Threlkeld, J. L. 1998. Thermal Environmental Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[6] Sun, C., Shu, S., Ding, G., Zhang, X., Hu X. 2013. Investigation of time lags and decrement factors for different building outside temperatures. Energy and Buildings, 61(2013), 1–7.

[7] Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ghafar, N. A., Ismail, M.A. 2014. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34(2014), 654–670.

[8] Khan, M. I. 2002. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. Building and Environment, 37(2002), 607–614.

[9] Dilmaç, Ş., Eğrican, N. 1994. Binalarda ısı konforu amaçlı enerji tüketimi üzerine malzeme seçiminin etkisi, Energy with All Aspects in 21st. Century Symposium, Bildiri Kitapçığı, İstanbul, 674-682.

[10] Eğrican, N., Onbaşıoğlu, H. 1993. Sinüzoidal dış etkiye maruz homojen bir duvarın ısıl analizi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 16(1993), 13-22.

[11] Asan, H., Sancaktar, Y. S. 1998. Effects of Wall's thermophysical properties on the time lag and decrement factor. Energy and Buildings, 28(1998), 159-166.

[12] Asan H., Effect of Wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. Energy and Buildings, 28(1998), 299-305.

[13] Ülgen, K. 2002. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. Energy and Buildings, 34(2002), 273-278.

[14] Zhang, Y., Lin, K., Zhang, Q., Di, H. 2006. Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermalphysical property material. Energy and Buildings 38(2006), 1164–1170.

[15] Oktay H., Yumrutas, R., Akpolat, A. 2015. Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. Construction and Building Materials. 96(2015), 217–25.

[16] Unal, O., Uygunoglu, T., Yildiz, A. 2007. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. Building and Environment, 42(2007), 584–590.

[17] Canakci, H., Demirboga, R., Karakoc, B., Sirin, O. 2007. Thermal conductivity of limestone from Gaziantep (Turkey). Building and Environment, 42(2007), 1777–1782.

[18] ACI Committee 122, 2002. Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems, Ame Concr Inst, ISBN 9780870310850.

[19] Yumrutaş, R., Unsal, M., Kanoglu, M. 2005. Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique. Building and Environment, 40(2005), 1117–25.

[20] Duffie, J. A, Beckman, W. A. 1991. Solar engineering of thermal process, Wiley New York.

[21] Kontoleon, K. J., Theodosiou, Th. G., Tsikaloudaki, K.G. 2013. The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements. Applied Energy, 112(2013), 325–337.

[22] Asan, H. 2006. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. Building and Environment, 41(2006), 615–620.

[23] Jin, X., Zhang, X., Cao, Y., Wang, G. 2012. Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. Energy and Buildings, 47(2012), 369–374.

[24] Zhang, Y., Dua, K., Hec, J., Yanga, L., Lia, Y., Lia, S. 2014. Impact factors analysis on the thermal performance of hollow block wall. Energy and Buildings, 75(2014), 330–341.

[25] Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Signorello, C. 2014. Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings. Energy and Buildings, 72(2014) 361–370.

[26] Barrios, G., Huelsz, G., Rechtman, R., Rojas, J. 2011. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. Energy and Buildings, 43(2011), 219–223.