

Hafif, Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Termofiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılması *

Fevziye AKÖZ ⁽¹⁾, Nabi YÜZER ⁽²⁾, Nihat KABAY⁽²⁾,
Ahmet B. KIZILKANAT ⁽²⁾ ve Büşra AKTÜRK ⁽²⁾

Özet

Doğal kaynakların sınırlılığı ve çevresel bozulmalar nedeni ile Türkiye’de üretim sürecinden tüketime, inşaat endüstrisinden enerji verimliliğine verilen önem günden güne artmaktadır. Beton, ekonomik olması, yüksek dayanım ve dayanıklılık gibi özellikleri ile Türkiye’de inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonun ısı performansı, enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir parametredir. Bu parametreyi betonun yoğunluğu, nem oranı ve agrega gibi bileşenler etkilemektedir.

Bu çalışmada, hafif beton, normal beton ve yüksek dayanımlı betonun ısı performansı araştırılmıştır. Bu amaçla betonların basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü deneysel olarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Betonun termofiziksel özelliklerini agrega cinsinin, mineral katkıların ve polimer lif varlığının etkilediği görülmüştür.

1. GİRİŞ

Gelişen ve gelişmekte olan dünyada artan enerji ihtiyacı 21. yüzyılın en önemli sorunlarından biridir. Fosil yakıtlar enerjinin ana kaynaklarından ve çevresel kirliliğe neden

A Comparative Study on The Thermo-Physical Properties of Light-Weight, Normal-Weight and High-Strength Concrete

In Turkey, the importance of energy efficiency in construction industry during different phases (manufacturing to consumption) is increasing due to the fact that, energy productions resource extensive process which lead to over utilization of limited natural resources and environmental degradation. Concrete is a widely used construction material in Turkey as it is economical and durable in long run. Thus, thermal performance of concrete is an important factor for its widespread applications and it depends on parameters such as density, moisture content and components such as aggregate.

olması, ekonomik ve yenilenebilir olması gibi -dezavantajları- olumsuzlukları vardır.

Dünyada ticari kullanım dışındaki toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %50’si binaların yaşam alanının uygun sıcaklıkta tutulmasında ve aydınlatılmasında harcanmaktadır. Örneğin ABD’de harcanan toplam enerjinin yaklaşık %40’ı ticari yapılar, şirketler ve konutların ısıtma-soğutma ve aydınlatması için harcanmaktadır. 2009 yılında fosil yakıtların yakılmasından kaynaklı CO₂ emisyonundan konutlar ve ticari sektör sırasıyla %22 ve %19’undan sorumludur ve bunun %70-77’sini elektrik harcaması ve aydınlatma ile ısıtma-soğutma gibi uygulamalar oluşturmaktadır [1].

Enerji üretimi pahalı ve aynı zamanda doğal kaynaklar ve çevre üzerinde yok edici etkilere sebep olduğu için Türkiye’de enerji verimliliğine verilen önem gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle, enerji

verimliliğini arttırmak ve binaların enerji tüketimini azaltmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [2-5]. Çevre sıcaklığına bağlı olarak binalar ısı kazanır veya kaybeder. Bu kazanç ve kayıpların miktarı, binaların ısıtma ve soğutması için harcanan enerji miktarını belirlediğinden binaların yaşam alanlarında ısı kayıp ve kazançları azaltılmalıdır. Bu durum tasarım aşamasında dikkate alınmalı, taşıyıcı sistem dâhil malzemelerin mekanik özellikleri yanında termal özellikleri de dikkate alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler:

Yüksek dayanımlı beton, hafif beton, normal dayanımlı beton, ısı iletim katsayısı, su buharı difüzyon direnç faktörü.

⁽¹⁾ Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

⁽²⁾ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı

* Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen 17. ERMCO Kongresi’nde sunulmuştur.

Sorumlu yazar: Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı, Davutpaşa Kampüsü, 34220, Esenler-İstanbul/Türkiye.

e-posta: bucarkosar@gmail.com

Yapı üretiminde birim ağırlık ve dayanım bakımından; normal (NB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve hafifbeton (HB) gibi farklı tip betonlar kullanılmaktadır. Bunların ısı özelliklerinin bilinmesi, uygun ısı yalıtımı ve yangına karşı güvenli tasarım olanağı sağlar. Betonların termal özellikleri yoğunluk, boşluk oranı, nem miktarı ve karışım oranlarına bağlıdır. Hafif betonun etüv kurusu yoğunluğu 800-2000 kg/m³, normal betonunki 2000-2600 kg/m³ arasındadır [6]. Normal betonun ısı iletim katsayısı 1-3,6 W/m²K arasında değişmektedir [7]. Hafif betonun ısı iletim katsayısı normal betona göre çok daha düşüktür ve ısı direnci geleneksel betona göre 6 kat daha fazladır [8] ve ısı yalıtımı için kullanılabilir. Basınç dayanımı 50 MPa üzerinde olan betonlar genel olarak yüksek dayanımlı olarak tanımlanır [9]. Boşluk oranının düşük olması nedeniyle YDB'lerin ısı iletim katsayıları normal betondan yüksektir.

Isı iletim katsayısının düşük olması yangın durumunda ısının daha geç yayılmasını ve yangının gecikmesini sağlar. Yapıyı oluşturan elemanlardaki tabakaların ısı iletim katsayısına (İİK), su buharı difüzyon direnç faktörüne (SBDDF) ve tabakaların sırasına bağlı olarak yapıda yoğunlaşma oluşabilir. Yoğunlaşma kontrolü TS 825'e göre yapılır. Bu kontrolde ana parametreler SBDDF ve İİK'dir [10]. Her iki özellik de malzemenin

boşluk oranı ile ilgilidir; boşluklar, malzemede ısı enerjisinin taşınımını zorlaştırırken su buharının taşınımını kolaylaştırır.

Kearsley ve Wainwright (2001) yoğunlukta ki azalmanın yani porozitedeki artışın betonun su buharı geçirimsizliğinde farkedilir miktarda artışa neden olduğunu belirtmişlerdir [11]. Başka bir çalışmada [12] da porozitedeki artışın SBDDF'de %30 azalmaya neden olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, hafif, normal ve yüksek dayanımlı olmak üzere üç farklı tipte betonun ısı performansı araştırılmıştır. Bu betonların İİK ve SBDDF sonuçları belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Malzemeler ve karışım oranları

2.1.1 Yüksek dayanımlı beton

YDB serilerinde bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R Portland çimentosu, puzolan olarak silis dumanı (SD) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), kalker esaslı iri agreg, kalker esaslı kırma kum ve silis esaslı doğal kum olmak üzere üç farklı boyutta agreg kullanılmıştır. SD ve GYFC %7 ve %10 oranında karışıma ilave edilmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1'de, dört farklı seriye ait (YDB1,YDB2,YDB3,YDB4) karışım oranları ve taze haldeki birim ağırlıkları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1: Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega türü	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Maksimum agreg boyutu (mm)	Karışım oranları (%)
İri agreg	2,76	12	60
Kırma kum	2,72	4	20
Doğal kum	2,61	4	20

Tablo 2:Yüksek dayanımlı beton karışım oranları

Malzemeler	YDB1	YDB2	YDB3	YDB4
Çimento (kg/m ³)	450	450	450	450
Su (kg/m ³)	127,5	127,5	127,5	127,5
İri agreg (kg/m ³)	1.128	1.128	1.128	1.128
Kırma kum (kg/m ³)	371	371	371	371
Doğal kum (kg/m ³)	355	355	355	355
Silis dumanı (kg/m ³)	31,5	31,5	31,5	31,5
Granüle yüksek fırın cürufu (kg/m ³)	45,0	45,0	45,0	45,0
Polipropilen lif (kg/m ³)	-	0,90	1,80	2,25
Süper akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	1,70	1,75	1,80	1,90
Birim ağırlık (kg/m ³)	2.610	2.610	2.610	2.580

2.1 .2 Normal beton

Karışım oranları Tablo 3'te verilen NB1, NB2, NB3 ve NB4 kodlu betonların üretiminde Portland çimentosu (CEM I 42,5 R), silis ve kalker esaslı olmak üzere iki tip agrega, SD, GYFC ve uçucu kül (UK) olmak üzere üç tip puzolan kullanılmıştır. SD, GYFC ve UK sırası ile % 5, 20 ve 40 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutulmuş ve istenen işlenebilirlik %1,1-1,15 oranlarında süper akışkanlaştırıcı ile sağlanmıştır. NB serilerinin karışım oranları ve taze haldeki birim ağırlıkları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Normal beton karışım oranları

Seriler	Çimento (kg)	Mineral Katkılar (kg)			Agrega (kg)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Birim Ağırlık (kg/m ³)
		Silis Dumanı	Cüruf	Uçucu Kül			
NB1	346	--	--	--	2.005	1,10	2.522
NB2	328	17	--	--	2.001	1,15	2.507
NB3	204	--	136	--	1.971	1,15	2.507
NB4	270	--	--	68	1961	1.15	2.488

2.1 .3 Hafif beton

Toplam 4 farklı hafif beton serisi; sabit su/çimento oranı ve iki farklı çimento dozajı ile üretilmiştir. Agregalar tüm serilerde maksimum dane çapı 8 mm olan asidik pomza taşı kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 4'te, HB serilerinin karışım oranları ve taze haldeki birim ağırlıkları ise Tablo 5'te verilmiştir. Bazı serilerde istenilen ısı özelliklerinin sağlanması için hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

Tablo 4: Agregaların fiziksel özellikleri

Malzemeler		0-1 (mm)	1-2 (mm)	2-4 (mm)	4-8 (mm)	Kırma Kum
β (kg/m ³) Kuru		795	627	579	563	1.750
γ (kg/m ³) SDYK		1.803	1.565	1.418	1.354	2.670
Karışım Oranı (%)		20	15	30	20	15
Su Emme Oranı (%)	10 dak.	8,7	8,7	11,5	10,5	-
	30 dak.	9,4	9,1	11,9	10,9	-
	1 saat	10,2	9,5	12,6	11,2	-
	24 saat	10,9	13,9	16,1	16,7	-

Tablo 5: Hafif beton karışım oranları

Seriler	Agrega (kg)		Çimento (kg)	Su (kg)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Hava Sürükleyici (%)
	Pomza	Kırma Kum					
HB1	633	270	350	192,5	1.570	2,2	-
HB2	858	270	350	192,5	1.455	2,2	0,3
HB3	705	218	500	275,0	1.700	1,0	-
HB4	688	217	500	275,0	1.465	1,0	0,3

2.2 Numunelerin hazırlanması

Basınç dayanımı için $\Phi 100/200$ mm boyutlu silindir, ısı iletim katsayısı (İİK) için $300 \times 300 \times 40$ mm boyutlu plak, su buharı difüzyon direnç faktörü (SBDDF) için $\Phi 100/40$ mm boyutlu disk numuneler üretilmiştir. Numuneler, deneylerin gerçekleştirildiği 28. güne kadar $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda kür edilmiştir.

2.3 Deney yöntemleri

Basınç dayanımı; YDB serilerinde 6'şar adet, NB ve HB serilerinde 3'er adet silindir numunede EN 12390-3'e göre (2010) belirlenmiştir [13].

Malzemenin SBDDF (μ), havanın su buharı özgeçirgenliğinin, malzemenin su buharı geçirgenliğine oranı olarak tanımlanır. Bu faktör, aynı zamanda su buharı direncinin, aynı sıcaklıkta ve aynı kalınlıktaki durgun bir hava tabakasına göre büyüklüğünü ifade eder.

SBDDF'nin deneysel olarak belirlenmesi için disk biçimindekinumuneler, içinde belirli miktarda kurutucu tuz (CaCl_2) bulunan kaba yerleştirilmiş, bu deney hücresi, sıcaklığı $23 \pm 1^\circ\text{C}$, bağıl nemi 85 ± 3 olan nem kabine konulmuştur. Nem kabinindeki kısmi buhar basıncı ile deney hücresi arasında kısmi buhar basıncı farklı olduğu için numuneden buhar geçişi sağlanmış, 24 saatte bir tartım yapılarak betonun buhar difüzyonu direnç faktörü (μ), aşağıdaki bağıntıdan (1) belirlenmiştir [14].

$$\mu = \frac{Da}{D} \quad D = \frac{\Delta m \times d \times R \times T}{S \times \tau \times M \times \Delta P_p} \quad (1)$$

Bağıntıda; **Da** ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) havadaki su buharının difüzyon katsayısı, **Δm** (kg) numuneye nüfuz eden su miktarı, **d** (m) numune kalınlığı, **S** (m^2) numune yüzey alanı, **τ** (s) suyun geçiş süresi, (**ΔP_p**) (Pa) numunenin alt ve üst yüzeyindeki kısmi buhar basıncı arasındaki fark, **R** ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) gaz sabiti, **M** (kg mol^{-1}) suyun molar ağırlığı ve **T** ($^\circ\text{K}$) sıcaklıktır.

Isı iletim katsayısının belirlendiği deney; TS ISO 8302'ye uygun [15], çift deney parçalı cihazda gerçekleştirilmiştir. Deneyde 2 adet $300 \times 300 \times 40$ mm boyutlu plak numuneler kullanılmıştır. Cihaz 500×500 mm boyutlarında bir adet bakır sıcak plaka ve iki adet çelik soğuk plakadan oluşmaktadır.

Deneyde 2 beton plak arasında bakır plaka, beton numunelerin alt ve üst kısmına çelik plakalar yerleştirilmiştir. Beton plaklar çelik ve bakır plakalardan daha küçük boyutlu olduğu için açıkta kalan kısımlar ısı yalıtım malzemesi ile kapatılmıştır. Sistemde, sıcak plakada 6 adet, soğuk plakada merkezde 2 adet olmak üzere toplam 8 adet ısı çift bulunmaktadır. Beton numunelerde sıcaklığın homojen olarak yayılması yani ısı dengenin sağlanması için, sıcaklık ve voltaj okumalarının sabitlenmesi gerekmektedir. Bunun için numu-

nelerin/sistemin yaklaşık 7 saat ısıtılması gerekmektedir. 7 saatin sonunda her ısı çift için karşılık gelen potansiyel değerleri voltmetre yardımı ile mikrovolt (μV) olarak ölçülmüş; değerleri standart yardımı ile sıcaklık ($^\circ\text{C}$) değerlerine çevrilmiştir. Isı iletim katsayısı aşağıdaki bağıntı (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{\Phi \times d}{A (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

Bu bağıntıda, λ ısı iletim katsayısını, Φ (W) ısıtma ünitesinin ölçme kısmına sağlanan gücü, **d** (m) deney parçasının ortalama kalınlığını, **T₁** ($^\circ\text{K}$) deney parçasının sıcak yüzeyinin, **T₂** ($^\circ\text{K}$) deney parçasının soğuk yüzeyinin ortalama sıcaklığını, **A** (m^2) deney parçasının ölçme alanını ifade etmektedir.

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

YDB serilerinin basınç dayanımı, 111-118 MPa arasındadır (Tablo 6). YDB3 serisi 118 MPa ile maksimum değeri, YDB2 serisi 111 MPa ile en düşük değeri almıştır. NB serilerinin basınç dayanımı; 30,9-38,4 MPa arasında değişmiş, NB1 serisi minimum, silis dumanı içeren NB2 serisi ise 38,4 MPa ile maksimum dayanıma ulaşmış, silis dumanı ilavesi basınç dayanımını arttırmıştır. HB serilerinin basınç dayanımı ise 13-28,5 MPa arasında değişmiş, basınç dayanımının beklendiği gibi çimento dozajının artması ile arttığı, hava sürükleyici katkı ilavesi ile de azaldığı görülmüştür.

Tablo 6'daki sonuçlara göre; YDB'lerin İİK'leri 1,85-2,62 W/m $^\circ\text{K}$ arasında değerler almıştır. Polipropilen (PP) lifin ısı iletim katsayısının (0,036-0,086 W/m $^\circ\text{K}$) düşük nedeni ile PP lif katkılı YDB2, YDB3, YDB4 serilerinin İİK değerleri katkısız YDB1 serisine göre daha düşük değerler göstermiştir. NB'lerin İİK'leri ise 1,89-2,02 W/m $^\circ\text{K}$ arasında değişmiştir. Farklı mineral katkıların ısı iletim katsayısında farkedilir bir değişime neden olmadığı görülmüştür. HB serilerinin İİK değerleri beklendiği gibi düşük değerler almıştır ve 0,42-0,52 W/m $^\circ\text{K}$ arasındadır. Hava sürükleyici katkı ilavesi ile betonda ilave boşluklar oluşturulmuş; bu sayede betonun İİK'si düşmüştür. Saygılı ve Baykal [16] İİK'deki düşüşün boşluk oranındaki artış ve birim ağırlıktaki düşüşten kaynaklı olduğunu belirtmiştir. Hava moleküler yapısı nedeniyle katı ve sıvı maddelere göre en zayıf iletken olduğu için betonda daha düşük İİK değerlerin elde edilmesini sağlar [17].

Yüksek dayanımlı beton (YDB) serilerinin Tablo 6'daki SBDDF sonuçlarına bakıldığında; değerler 86-132 arasındadır. Bu değerlerin mineral katkı ilavelerinden kaynaklı olduğu, mineral katkı ilavesi ile daha yoğun içyapı ve daha düşük porozite nedeniyle bu sonuçların elde edildiği tahmin edilmektedir. Bu katkılar çimento hidrasyonu sonucu oluşan serbest kireç ile tepkimeye girerek ilave C-S-H oluşturur, bu sayede hem çimento pastasındaki hem de çimento agrega arayüzeyde-

ki boşluk oranı azalmaktadır [18]. Bilindiği gibi günümüzde beton üretiminde mineral katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır; bu durum dikkate alındığında YDB'lerde SBDDF'nin artması beklenir. Önceki çalışmalarda da SBDDF'nin boşluk oranındaki düşüş ve birim ağırlıktaki artış ile artacağı belirtilmiştir [11,12]. Bu çalışmada, en büyük ve en küçük değer sırasıyla YDB1 ve YDB4 serilerinde görülmektedir. PP lif miktarındaki artış SBDDF'de düşüşe neden olmuş, YDB4 serisindeki düşüş referans serisine göre % 35 oranına ulaşmıştır.

NB serilerinin SBDDF değerleri 31-51 arasında değerler almış ve SBDDF sonuçları TS 825'te verilen değerlerin altında kalmıştır.

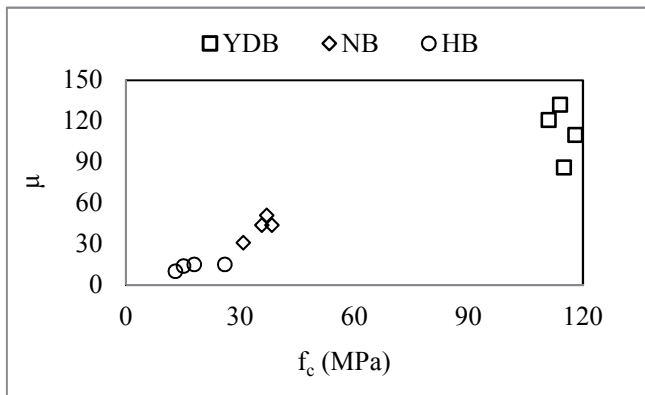
HB serilerinin SBDDF değerleri beklediği gibi 10-15 gibi çok düşük değerler almıştır. Hava sürükleyici katkı betonda ilave boşluklar oluşmasına neden olmuş ve SBDDF değeri de buna bağlı olarak düşmüştür; özellikle HB4 serisinde bu düşüş büyük orandadır (%31).

Tablo 6: Beton serileri için deney sonuçları

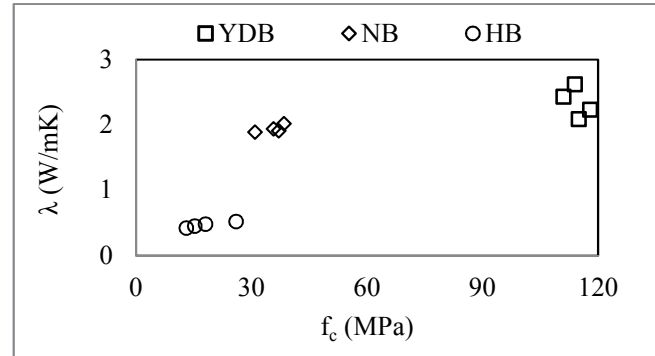
Beton Tipi	D (kg/m ³)	f _c (MPa)	λ (W/mK)	μ
HB	1.189-1.468	13,0-26,0	0,42-0,52	10-15
NB	2.488-2.522	30,9-38,4	1,89-2,02	31-51
YDB	2.520-2.540	114,0-118,0	2,09-2,62	86-132

3.1 Termofiziksel özelliklerin karşılaştırılması

Deney sonuçları değerlendirildiğinde, basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü sonuçlarının betonun birim ağırlığı ile ilgili olduğu görülmektedir. HB serileri en düşük basınç dayanımı, ısı yalıtım katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü değerlerini alırken, YDB serilerinde maksimum basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü değeri elde edilmiştir (Tablo 6, Şekil 1 ve 2).



Şekil 1: Serilerin basınç dayanımı-su buharı difüzyon direnç faktörü (f_c-μ) ilişkisi



Şekil 2: Serilerin basınç dayanımı-ısı iletim katsayısı (f_c-λ) ilişkisi

Basınç dayanımı 13-28,5 MPa arasında önemli değişim gösteren HB serilerinin ısı iletim katsayısı 0,42-0,52 W/mK, su buharı difüzyon direnç faktörü 10-16 arasında değerler almış, önemli bir değişim göstermemiştir.

NB serilerinin basınç dayanımındaki (30,9-38,4 MPa) ve ısı iletim katsayısındaki küçük (1,89-2,02 W/mK) değişikliklerin aksine SBDDF değerleri önemli oranda değişmiştir (31-51). Burada mineral katkıların etkisinin olduğu söylenebilir.

YDB serilerinin basınç dayanımı 114,0-118 MPa gibi yakın değerler alırken, ısı iletim katsayısı 2,09-2,62 W/mK, SBDDF değerleri 86-132 arasında önemli oranda değişmiştir. Bu betonların ısı iletim katsayısı ve SBDDF değerlerindeki farkın PP ilavesi kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hafif beton birim ağırlık, basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı açısından en düşük değerleri, yüksek dayanımlı beton ise en yüksek değerleri göstermektedir.
- Hafif agregalı beton bu özellikleri ile elemanlarda ısı kaybının, harcanan yakıtın, dolayısı ile de CO₂ salınımının azaltılmasına katkıda bulunacaktır.
- Normal betonun su buharı difüzyon direnç faktörü 31-51 arasında değişmektedir ve bu değer TS 825'te verilmiş olan değerlerden düşüktür. TS 825'te yüksek dayanımlı beton için de herhangi bir değer belirtilmemiştir. İlgili standarttaki değerler, farklı özellikteki betonlar için gözden geçirilmelidir.
- Termofiziksel özellikler sadece birim ağırlık ve basınç dayanımından değil, agrega tipi, mineral katkı ilavesi ve polimer lif ilavesinden de etkilenmektedir.
- Termofiziksel özelliklerin beton karışımları/özellikleri ile değiştiği ilgili standartlarda ve yapı fiziği problemlerinin analizlerinde dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- (1) Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 2009, April 15, 2011.
- (2) Pérez-García, A., VÍllora, A.G. Pérezand G.G., "Building's eco-efficiency improvements based on reinforced concrete multilayer structural panels", Energy and Buildings, 85, (2014) 1-11.
- (3) Hall, M.R., Najim, K.B. ve Hopfe,C.J.,"Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings, Applied Thermal Engineering, 33-34, (2012) 77-85.
- (4) Drochytka, R., Zach, J., Korjenic, A. ve Hroudová, J., "Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste", Energy and Buildings, 58, (2013) 319-323.
- (5) Jerman, M., Keppert, M., Výborný, J. ve Černý, R., "Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete", Construction and Building Materials, 41, (2013) 352-359.
- (6) Bazant Z.P. and Kaplan M.F., "Concrete at High Temperatures", Longman Group, 1. Edition, (1996) London.
- (7) TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, 2002.
- (8) Newman, J. veChoo, B.S. Advanced Concrete Technology-Processes, (2003),ISBN: 978-0-7506-5105-9.
- (9) ACI 363R-92, Report on High Strength Concrete, American Concrete Institute, 55 pages, (1997).
- (10) TS825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, (2013).
- (11) Kearsley, E.P and Wainwright, P.J., "Porosity and permeability of foamed concrete", Cement and Concrete Research, 31(5), (2001) 805-812.
- (12) Kabay, N., "Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi", in Turkish, Doctorate Thesis, Yıldız Technical University, (2009), Istanbul.
- (13) BS EN 12390-3: Testing hardened concrete, Compressive strength of test specimens (2009).
- (14) TS EN 12086, Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties(2013).
- (15) TS ISO 8302 Thermal insulation; determination of steady-state thermal resistance and related properties; guarded hot plate apparatus, (2002).
- (16) Saygılı, A., Baykal. G., "A new method for improving the thermal insulation properties of fly ash", Energy and Buildings,43(11), (2011) 3236-3242.
- (17) Ng, S.C. veLow, K.S., "Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel", Energy and Buildings,42(12), (2010) 2452-2456.
- (18) Mehta P.K ve Monteiro, P.J.M., Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill, third edition, (2006).