

AGREGA POROZİTESİNİN HAFİF BETONLARIN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Metin DAVRAZ *, Ebru BAŞPINAR

Özet

Bu çalışmada, doğal ve yapay hafif agregalardan elde edilen hafif betonların görünür ve teorik boşluk oranlarının, hafif betonun birim hacim kütlelerine, basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Araştırmada 5 farklı kökende doğal ve bir yapay hafif agrega türü ile kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Çimento dozajı ve su/çimento oranı sabit tutularak, Portland çimentosuyla hafif beton ve kontrol betonu karışımları hazırlanmış, karışımlar küp, silindir ve prizmatik numune kalıplarına dökülmüş ve eşit kür koşullarında bekletilmiştir. Hafif beton örneklerinin birim hacim kütleleri, görünür ve teorik boşluk oranları, basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek, görünür ve teorik boşluk oranlarının beton fiziko-mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, hafif betonların birim hacim kütle ve basınç dayanımlarının teorik boşluk oranı ile yakın ilişkisi ortaya konulmuştur. Ayrıca teorik boşluk oranı kullanılarak bu özelliklerin tahminine yönelik eşitlikler de önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif beton, boşluk oranı, birim hacim kütle, basınç ve eğilme dayanımı.

EFFECT OF POROSITY OF AGGREGATE ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

Abstract

In this study, the physical properties of natural and artificial aggregates were determined. The effects of apparent and theoretical pore rates of lightweight concretes obtained from these aggregates on the mass per unit volume, compressive strength and flexure strength of concrete samples were investigated.

Five different types of natural LWA, one type of artificial LWA and limestone aggregate were used in this study. Dosage of cement and w/c ratio was kept constant in the mix designs of normal and lightweight concrete samples and Portland cement was used in this mixtures. Prepared fresh concretes were poured into cube, cylinder and prismatic moulds and concrete samples were kept under the same curing conditions. The mass per unit volumes, apparent and theoretical pore rates, compressive strengths and flexure strengths of lightweight concretes samples were determined and the effects of apparent and theoretical pore rates on physico-mechanical properties of samples were investigated. As a result, the close relationship between the mass per unit volume and compressive strength with theoretical pore rate in lightweight concretes were presented. In addition, by using theoretical pore rates, it was also proposed the equations for the estimation of these properties.

Key Words: Lightweight concrete, pore ratio, the mass per unit volume, compressive and flexure strength

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Senirkent Meslek Yüksek Okulu, Teknik Programlar Bölümü, 32600, Isparta/TÜRKİYE.
E-posta: metindavraz@sdu.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde, gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan ve gelişmekte olan ülkelerde de yaygınlaşmaya başlayan “hafif beton” kullanımı eski zamanlara dayanmaktadır. Sümerler M.Ö. 3000 yıllarda Babylon’u inşa ederken kullanmışlardır. Romalılar ve Yunanlılar Ayasofya kilisesinde (M.S. 4 yy.), Roma tapınağında (M.S. 118), amfi tiyatrolarında (M.S. 70 yy. ve 80 yy.), su kemerlerinde (M.S. 14 yy.) olduğu gibi bazı yapı inşaatlarında hafif agrega olarak pomzayı kullanmışlardır. Maya medeniyeti ise piramitlerin (Meksika) yapımında (M.S. 624-987 yy.) hafif agregaların kullanıldığı bilinmektedir (Chandra ve Berntsson 2002).

Hafif beton üretiminde hafif agrega kullanımı ile birim ağırlığı istenen düzeyde tutmak önemlidir. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar, doğal olarak oluşmuş, elenmiş ve kırılmış hafif agregalar ile doğal hammaddelerin yada endüstriyel atıkların ısıl işleme maruz kalmasıyla elde edilen hafif agregalardır. Doğal hafif agregalar genellikle pomza, volkanik cüruf, tüf vb. volkanik kökenli olup ilk kullanılan hafif agregalardır. Doğal malzemeden üretilen yapay hafif agregalar, genişletilmiş kil, genişletilmiş şist, genişletilmiş arduvaz, perlit, vermikülit ile strafor (styropor) gibi polimer esaslı malzemelerdir. Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar, genişletilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu küldür. Agreganın özellikleri, kayacın özelliklerine ve üretim yöntemlerine bağlıdır (Ateş, 2000).

Hafif agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri, hafif betonun özelliklerini belirler. Lo vd. (2007) yaptıkları çalışmada hafif betonun dayanımının hafif agreganın dayanımına ve sertleşmiş çimento harcına bağlı olduğunu vurgulamıştır. Hafif agregaların çoğu gözenekli ve suyu emme özelliğe sahiptir. Hafif agregaların gözenekli ve su emme özelliğine sahip olması su/çimento oranını, bununla birlikte betonun birim hacim kütlelerini, işlenebilirliğini ve dayanıklılığını da etkilemektedir.

Sarkar vd. (1992), farklı genişletilmiş kil agrega örnekleri (Leca -İsveç ve Liapor -Alman) ve bu örneklerden elde edilen hafif betonları incelemişlerdir. Liapor ve Leca agregaları tane yoğunlukları yakın olmasına karşın, Liapor’un bağlantılı gözenek oranı, Leca’dan yaklaşık iki kat yüksek bulunmuştur. Leca agregası ile üretilen hafif beton örneklerinin birim ağırlığı daha düşük, Liapor agregası ile üretilen hafif beton örneklerinin basınç dayanımları ise daha yüksektir. Sarkar vd., özellikle Liapor agregalı betonların basınç dayanımındaki yükseklik, bağlantılı gözenek yapısındaki artışa bağlı olarak, çimento hamuru-agrega arayüzü mikro yapısının gelişmesine ve aderansın iyileşmesine bağlamışlardır.

Lo vd. (2008), hafif agregaların su emmesinin hamur-agrega arayüzündeki gözenek dağılımına etkilerini araştırmışlardır. Bunun için farklı s/ç oranlarında hazırlanan harç örneklerinin SEM görüntü analizlerinde, arayüz bölgesindeki gözenek miktarına s/ç oranından daha çok, hafif agreganın su emmesinin etki ettiğini belirlemişlerdir. Yüksek su emme oranına sahip hafif agregalarda arayüz bölgesindeki boşluk oranının arttığı bildirilmiştir. Arayüz bölgesindeki boşluk oranının artması, özellikle hafif betonlarda mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

Bu çalışmada 5 farklı kökende doğal ve bir yapay hafif agrega türü ile kireçtaşı agregası kullanılarak hazırlanan hafif beton örneklerinin birim hacim kütleleri, görünür ve teorik boşluk oranları, basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek, görünür ve teorik boşluk oranlarının beton fiziko-mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler, Özellikleri ve Yöntem

Beton karışımlarında bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kontrol betonu örneklerinde agregata olarak Isparta Belediyesi taş ocağından temin edilen kireçtaşı kırmataş agregası (KÇT), hafif beton örneklerinde doğal hafif agregata olarak Isparta-Karakaya pomzası (IKP), Isparta-Gelincik pomzası (IGP), Kayseri pomzası (KP), Nevşehir pomzası (NP), Kula volkanik cürufu (KVC) ve yapay hafif agregata olarak geliştirilmiş kil agregata (GKA) kullanılmıştır. Tüm agregalar kare gözlü eleklerden elenmek suretiyle iki farklı tane boyut grubuna (0/4 mm ve 4/8 mm) ayrılmıştır. Agregata fiziksel özellikleri TS 699 (2009) ve TS EN 1097-6 (2002) standardına göre belirlenmiştir. Agregata kimyasal analizleri GÖLTAŞ Kalite Kontrol Laboratuvarı'na yaptırılmıştır. Çimento ve agregata özelliklerine ait bilgiler Tablo 1, 2 ve 4'de verilmiştir.

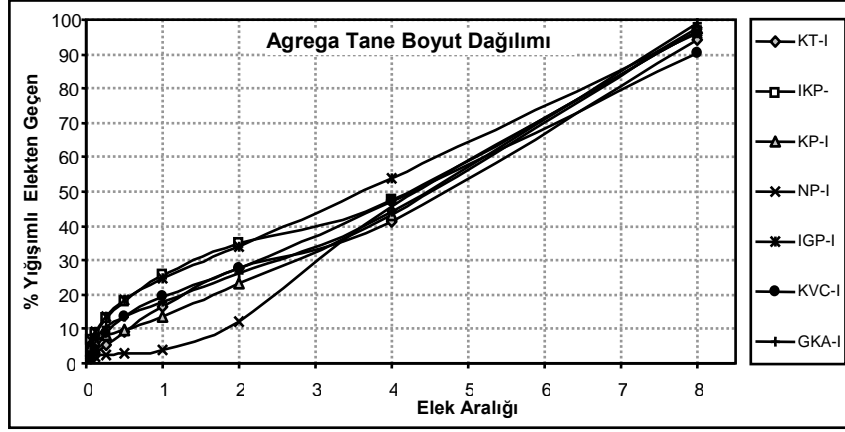
Tablo 1. Beton karışımlarında kullanılan çimentonun TS EN 197-1 (2002) standardına uygunluk analiz sonuçları
(Göлтаş Kalite Kontrol Lab. Aylık (Kasım) Çimento Analiz Sonuçları, (2007))

	Blaine (cm ² /g)	Ö. A. (g/cm ³)	Priz Baş. (Dak.)	Genleşme (mm)	Mukavemet Değerleri (MPa)			SO ₃ (%)	K.K (%)	Ç.K (%)	Cl ⁻ (%)	C ₃ S
					B2	B7	B28					
Ort.	3133	3.12	158	1	27.1	42.3	56.0	2.84	1.94	0.29	0.004	58.95
SDS.	123.84	0.01	22.04	0	2.14	2.21	1.38	0.13	1.14	0.091	0.003	4.17
Min.	2980	3.11	140	1	23.3	37.8	54.5	2.63	1.00	0.10	0.001	52.82
Maks.	3370	3.14	200	1	30.0	44.6	58.1	3.00	3.83	0.40	0.010	64.57

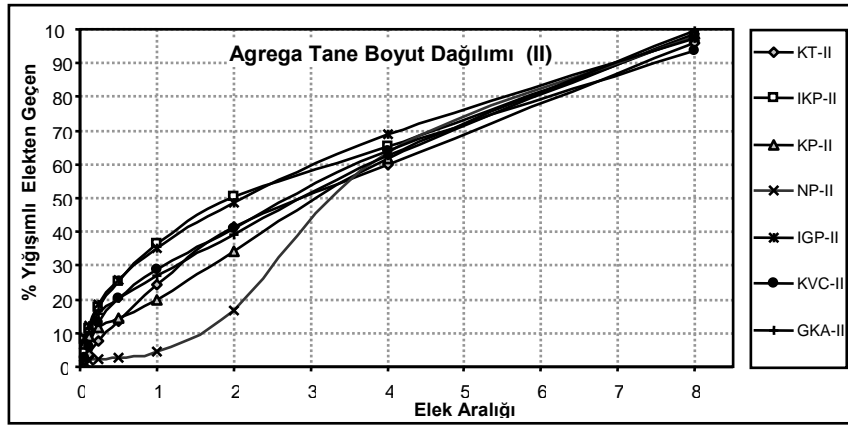
Tablo 2. Agregaların kimyasal bileşenleri

Malzeme Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	A.Z.	CaCO ₃	MgCO ₃	R ₂ O
IKP	56.25	16.99	4.80	7.60	1.50	4.20	5.25	0.25	2.83	-	-	-
IGP	60.50	17.15	3.38	4.68	2.09	4.30	4.54	0.16	2.64	-	-	-
KP	67.50	14.90	3.10	2.90	2.51	4.00	2.75	0.10	2.18	-	-	-
NP	72.37	12.93	1.29	0.75	0.21	3.52	4.42	0.007	3.80	-	-	-
KVC	45.75	15.66	10.68	8.83	5.93	5.19	6.48	0.036	1.52	-	-	-
GKA	62.80	16.05	9.08	3.76	2.02	1.68	3.28	0.17	0.89	-	-	-
KÇT	0.66	-	-	31.82	20.03	-	-	-	46.73	56.82	42.06	0.42

Araştırmada hacimce iki farklı agregata granülometrisi kullanılmıştır. TS 3530 EN 933-1'e (1999) göre agregaların tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Agregata gradasyonunun beton fiziko-mekanik özelliklerine etkisini de inceleyebilmek için iki farklı agregata karışım oranı kullanılmıştır. I.grupta % 60 oranında 4/8 mm ve % 40 oranında 0/4 mm, II. grupta ise % 60 oranında 0/4 mm ve % 40 oranında 4/8 mm tane boyutlarındaki agregalar beton karışımına dâhil edilmiştir. I. grup ve II. grup agregalara ait tane boyut dağılımları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Agregat karışımlarının tane boyut dağılımları (I. grup).



Şekil 2. Agregat karışımlarının tane boyut dağılımları (II. grup).

2.2. Karışım Oranları, Örneklerin Hazırlanması ve Kür Koşulları

Beton örneklerinin porozite, birim ağırlık ve basınç dayanımı özelliklerinin karşılaştırılabilmesi için iki farklı karışım oranında 14 karışım hazırlanmıştır. Beton karışım oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Karışım oranları

Karışım No	Çimento (kg/m ³)	Agregat (kg/m ³)		Su (kg/m ³)	s/ç	Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	
		0/4 mm	4/8 mm				
I. Grup	300	KB I	817	1108	150	0.5	4.5
		IKP I	447	461			
		IGP I	386	286			
		KP I	257	305			
		NP I	376	369			
		KVC I	606	765			
		GKA I	373	507			
II. Grup	300	KB II	1181	773	150	0.5	4.5
		IKP II	640	321			
		IGP II	553	200			
		KP II	368	213			
		NP II	538	257			
		KVC II	869	533			
		GKA II	534	354			

Beton karışımları hazırlanmadan önce hafif agregalar doygun-yüzey kuru duruma getirilmiştir. TS EN 12390-1 (2002)'de belirtilen deney numune boyutlarına uygun olarak, her bir karışımdan;

-Birim hacim kütle deneyleri için 3 adet 100 mm küp,

-Tek eksenli basınç dayanımı için 3 adet 150 x 300 mm standart silindir,

-Eğilme dayanımı tayini için 40 x 40 x 160 mm prizma beton örnekleri hazırlanmıştır. Tüm karışımların teorik hesaplamalarında s/ç oranı (0.5), çimento dozajı (300 kg/m³), hacimce toplam agregası içeriği (% 73) ve hava içeriği (% 2) sabit tutulmuş, işlenebilirliği sağlamak için çimento ağırlığının % 1.5'i oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Dökümü yapılan beton örnekleri 24 saat sonunda kalıptan çıkarılmış ve deney süresine kadar TS EN 12390-2 (2002)'ye göre kür havuzunda bekletilmiştir.

2.3. Fiziksel ve Mekanik Deneyler

Normal ve hafif beton örneklerinin boşluk oranı tayini TS 3524 (1980) standardında tanımlanan ölçütlere göre belirlenmiştir. Bu amaçla; 28 günlük kür süresini tamamlamış 100 mm boyutlarındaki küp örnekler 24 saat süreyle 105 °C'de değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurularak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca TS EN 12390-7 (2002)'ye göre, 1/100 mm hassasiyetli elektronik kumpasla numune boyutları ölçülerek, birim hacim kütleleri hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$D = M/V \quad (1)$$

D: Numune (kuru durumda birim hacim kütlesi (kg/m³),
M : Numune (kuru) ağırlığı (kg),
V : Numune hacmi (m³).

Daha sonra 21 ± 2 °C'de kür havuzunda 24 saat bekletilerek doymuş hale getirilmiş, numunelerin su içindeki ağırlığı tartılmış, doymuş hale gelen numuneler su içerisinden çıkarılıp yüzeyleri kuru hale getirildikten sonra doymuş kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir (TS EN 3526, 1981). Beton örneklerinin ölçümlenen boşluk oranları Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır:

$$P_0 = (W_{DKY} - W_K) / (W_{DKY} - W_S) \quad (2)$$

P₀ : Sertleşmiş beton numunesinin görünür boşluk oranı (%),
W_{DKY} : Sertleşmiş beton numunesinin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g),
W_K : Sertleşmiş beton numunesinin etüv kurusu ağırlığı (g),
W_S : Sertleşmiş beton numunesinin su içindeki ağırlığı (g)

Ayrıca Eşitlik 3'de verilen bağıntı kullanılarak beton örneklerinin teorik boşluk oranları da hesaplanmıştır:

$$P_t = [1000 - ((W_C / \rho_C) + (W_{A1} / \rho_{A1}) + (W_{A2} / \rho_{A2}))] / 10 \quad (3)$$

P_t : Betonun teorik (hesaplanan) boşluk oranı (%),
W_C : Karışıma giren çimento miktarı (kg),
W_{A1} : Karışıma giren iri agregası miktarı (kg),
W_{A2} : Karışıma giren ince agregası miktarı (kg),
 ρ_C : Çimento özkütlesi (g/cm³)
 ρ_{A1} : İri agregası özkütlesi (g/cm³)
 ρ_{A2} : İnce agregası özkütlesi (g/cm³)

Basınç dayanımı deneyleri 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamlamış standart silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-3 (2010) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 0.34 MPa/s seçilmiş ve bu hız bütün beton örneklerinde sabit tutulmuştur.

Eğilme dayanımı deneyleri, 28 günlük kür süresini tamamlamış 40 x 40 x 160 mm boyutlarına haiz prizmatik beton örnekleri ile TS EN 12390-5 (2002) standardına uygun olarak yürütülmüştür. Orta noktadan kuvvet uygulanarak yükleme yöntemine göre yürütülen eğilme dayanımı deneyleri esnasında yükleme hızı 0.05 MPa/s seçilmiştir. Beton örneklerinin eğilme dayanımı Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır (TS EN 12390-5, 2002):

$$f_{cf} = 3/2 \times (F \times L) / (d_1 \times d_2^2) \quad (4)$$

f_{cf} : Eğilme dayanımı, (MPa, N/mm²),
 F : Uygulanan en büyük yük (N),
 L : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm),
 d_1, d_2 : Numunenin kesit boyutları (mm).

3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

3.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Etüv kurusu tane yoğunluğu (ρ_{rd}), agreganın kütlelerinin uzayda kapladığı hacme (toplam gözenek hacmi + boşluksuz matris hacmi) oranı olarak ifade edilebilir. Agreganın görünür porozitesi (açık gözenek oranı) ve gerçek porozitesi (açık + kapalı gözenek oranı) etüv kurusu tane yoğunluğunu, dolayısıyla hafif betonların birim hacim kütlesi, basınç dayanımı gibi fiziko-mekanik özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Bu çalışmada incelenen hafif agregaların görünür porozite (η_0), gerçek (η_1) porozite ve kapalı gözenek oranı bulguları Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4 değerlendirildiğinde;

- 4/8 mm tane boyut aralığında en yüksek toplam porozite oranlarına IGP (%73) ve KP (%71) agregaları sahiptir. Ancak KP’nin kapalı gözenek oranı (%30), IGP’den (%21) daha yüksektir. Bu boyut aralığında, en düşük toplam porozite oranını KVC (%37) agregası sergilemiştir.

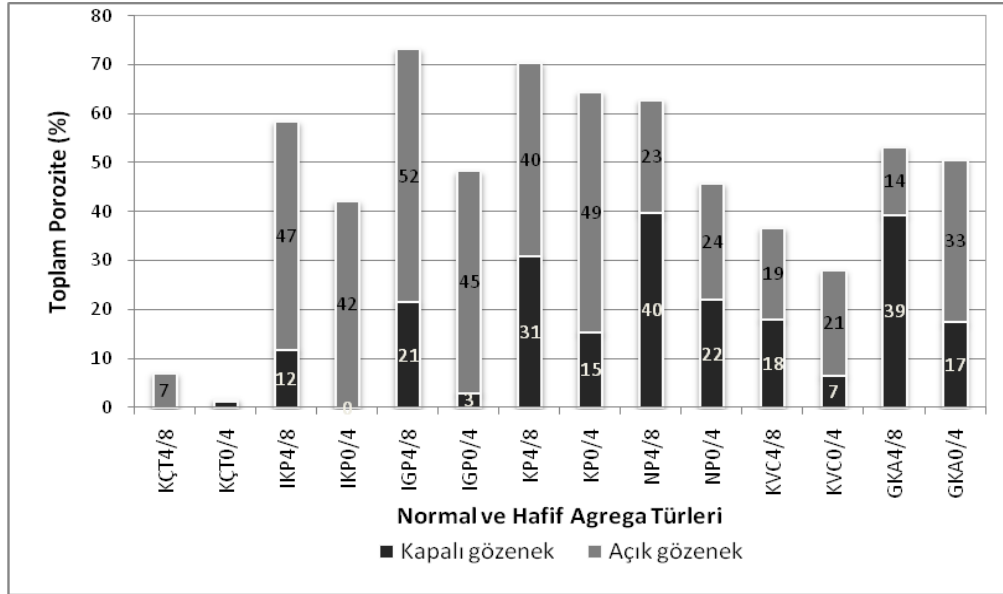
- 0/4 mm tane boyut aralığında ise en yüksek toplam porozite oranlarını KP (% 64) ve GKA (%51) hafif agregaları gösterirken, GKA agregasının kapalı gözenek oranı (% 17), KP’den (%15) daha yüksektir. Bu boyut aralığında en düşük toplam poroziteye KVC (% 28) agregası sahipken, en düşük kapalı gözenek oranını ise IGP (% 3) agregası göstermiştir.

Tablo 4. Beton karışımlarında kullanılan agregaların TS 699 (2009) ve TS EN 1097-6’ya (2002) göre fiziksel özellikleri

Agrega Tipi	ρ_{ort} (gr/cm ³)	ρ_{rd} (gr/cm ³)	ρ_a (gr/cm ³)	ρ_{ssd} (gr/cm ³)	η_1 (%)	η_0 (%)	k_0 (%)	k_g (%)	Kapalı Gözenek Oranı (%)
KÇT4/8	2.771	2.576	2.770	2.646	7.032	7.014	92.968	92.986	0.018
KÇT0/4		2.723	2.738	2.728	1.729	0.569	98.271	99.431	1.160
IKP4/8	2.577	1.071	2.005	1.537	58.426	46.548	41.574	53.452	11.878
IKP0/4		1.489	2.575	1.911	42.229	42.177	57.771	57.823	0.052
IGP4/8	2.489	0.665	1.380	1.183	73.263	51.778	26.737	48.222	21.485
IGP0/4		1.287	2.352	1.740	48.278	45.264	51.722	54.736	3.015
KP4/8	2.407	0.709	1.175	1.106	70.526	39.624	29.474	60.376	30.903
KP0/4		0.855	1.667	1.345	64.469	49.019	35.531	50.981	15.450
NP4/8	2.311	0.858	1.114	1.088	62.874	23.024	37.126	76.976	39.851
NP0/4		1.252	1.644	1.491	45.799	23.835	54.201	76.165	21.964

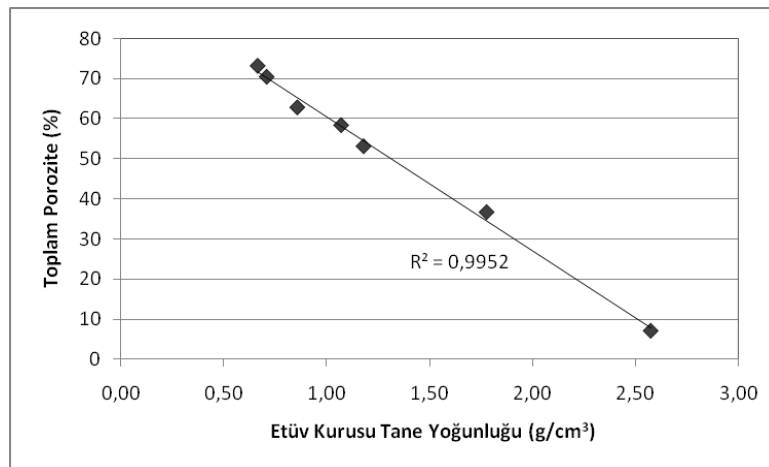
KVC4/8	2.808	1.778	2.185	1.964	36.695	18.631	63.305	81.369	18.064
KVC0/4		2.021	2.574	2.236	28.032	21.481	71.968	78.519	6.550
GKA4/8	2.519	1.180	1.368	1.318	53.152	13.758	46.848	86.242	39.394
GKA0/4		1.243	1.860	1.575	50.652	33.181	49.348	66.819	17.471
ρ_{ort} : Özkütle	ρ_{td} : Etüv kuru tane yoğunluğu	ρ_{rd} : Görünür tane yoğunluğu	ρ_{ssd} : Doygun kuru yüzey tane yoğunluğu						
η_0 : Görünür porozite	η_1 : Gerçek porozite	k_g : Görünür kompozite	k_0 : Gerçek kompozite						

Normal ve hafif agregaların toplam poroziteleri, açık ve kapalı gözenek oranları Şekil 3’de gösterilmiştir.

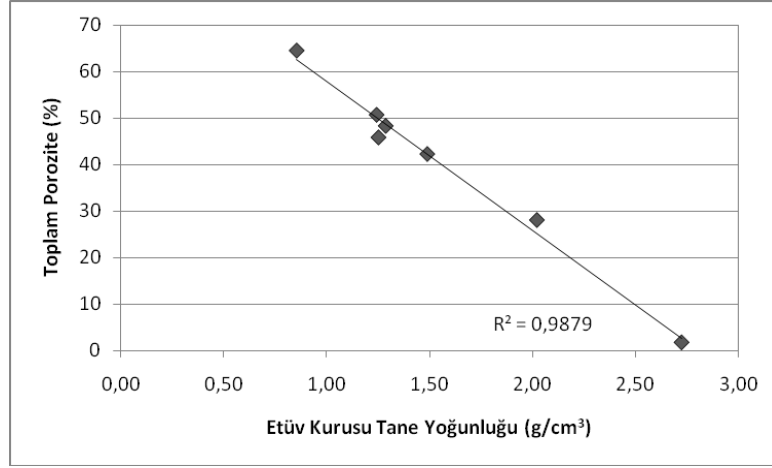


Şekil 3. Normal ve hafif agregaların toplam porozitesi, açık ve kapalı gözenek oranları

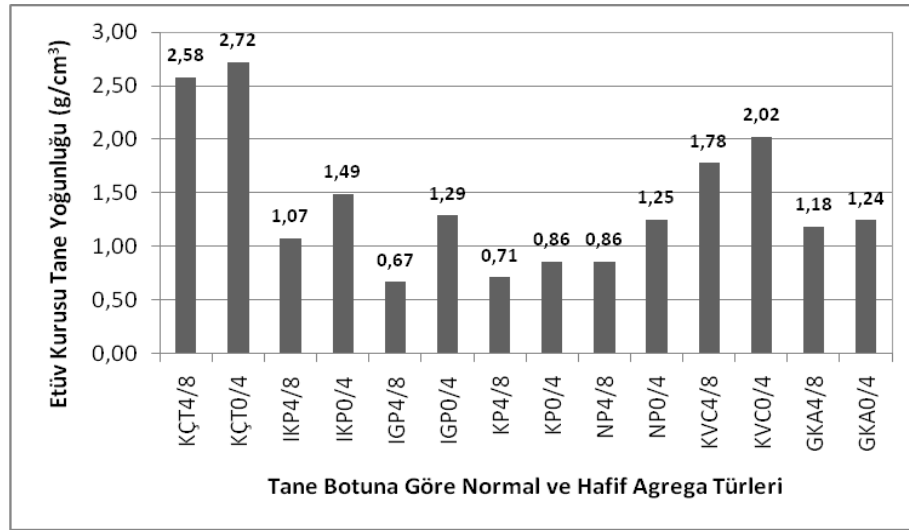
Araştırılan hafif agregalar türleri içerisinde, en düşük etüv kuru tane yoğunluğuna, 4/8 mm tane boyut aralığında IGP (0.665 g/cm^3), 0/4 mm tane boyut aralığında ise KP (0.855 g/cm^3) sahiptir. Bu değerler hafif agregaların toplam porozite oranları ile de uyumludur (Şekil 4 ve Şekil 5). Buna karşılık, hafif agregalar türleri içerisinde en düşük gerçek porozite oranına sahip KVC agregası hem 4/8 mm ve hem de 0/4 mm tane boyutu aralıklarında en yüksek etüv kuru tane yoğunluğu (sırasıyla 1.178 ve 2.012 g/cm^3) değerlerini göstermiştir (Şekil 6).



Şekil 4. 4/8 mm tane boyutlu agregalarda etüv kuru tane yoğunluğu-toplam porozite ilişkisi



Şekil 5. 0/4 mm tane boyutlu agregalarda etüv kuru tane yoğunluğu-toplam porozite ilişkisi



Şekil 6. Normal ve hafif agreg türlerinin etüv kuru tane yoğunlukları

3.2. Hafif Beton Birim Hacim Kütleleri

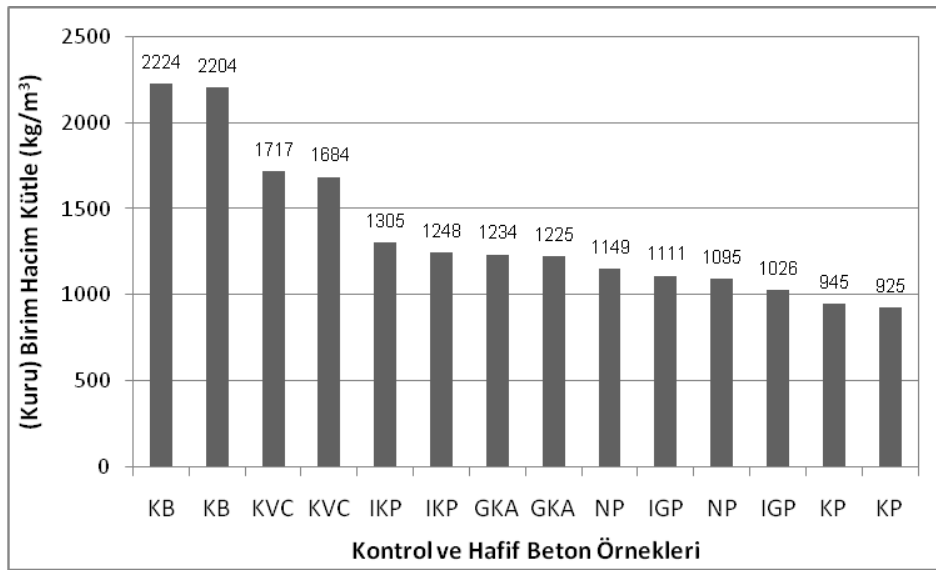
Çimento dozajı, s/ç oranı, agreg granülometrisi, (agrega, çimento, mineral katkı gibi) katı bileşenlerin özkütlesi, hapsolmuş-sürüklenmiş hava içeriği, kıvam, sıkıştırma yöntemi ve süresi gibi birçok parametre sertleşmiş betonun birim hacim kütlelerini etkiler. Ancak özellikle hafif betonlarda birim hacim kütle değerine agreg etüv kuru tane yoğunluğunun etkisi büyüktür. Araştırma kapsamında normal ve farklı türde hafif agregaların kullanıldığı hafif beton örneklerinin (kuru) birim hacim kütleleri (D) Tablo 5 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bulgular TS EN 206-1 (2002) standardına göre yorumlandığında;

- KP I ve KP II hafif beton örneklerinin D1.0,
- IGP I, IGP II, NP I ve NP II hafif beton örneklerinin D1.2,
- IKP I, IKP II, GKA I ve GKA II hafif beton örneklerinin D1.4,
- KVC I ve KVC II hafif beton örneklerinin D1.8 birim hacim kütle sınıfında yer almaktadır.

Tablo 5. Hafif betonların birim hacim kütle sınıflaması ve hafif beton hacim kütle değerleri (TS EN 206-1, 2002).

Hafif Betonların Birim Hacim Kütesine Göre Sınıflandırılması (TS EN 206-1)														
Sınıf	D1.0		D1.2		D1.4		D1.6		D1.8		D2.0			
Sınır Aralık (kg/m ³)	<1000		1000-1200		1200-1400		1400-1600		1600-1800		1800-2000			
Grup	I							II						
Örnek	KB	IKP	IGP	KP	NP	KVC	GKA	KB	IKP	IGP	KP	NP	KVC	GKA
B.H.Kütle(kg/m ³)	2204	1248	1026	925	1095	1684	1225	2224	1305	1111	945	1149	1717	1234

Bulgular değerlendirildiğinde, sabit çimento dozajı ve sabit s/ç oranı koşullarında, hafif betonların birim hacim kütle değerleri ile agreganın gerçek porozite oranları ve etüv kurusu tane yoğunluklarının uyumlu olduğu görülmektedir. II. grup örneklerde ince agreganın oranındaki %20'lik artış, bu grupta yer alan hafif betonların birim hacim kütlelerini nispeten (%1-7) artırmıştır.



Şekil 7. Kontrol ve hafif beton örneklerinin birim hacim kütleleri

3.3. Hafif Beton Boşluk Oranı (P_0 , P_t)

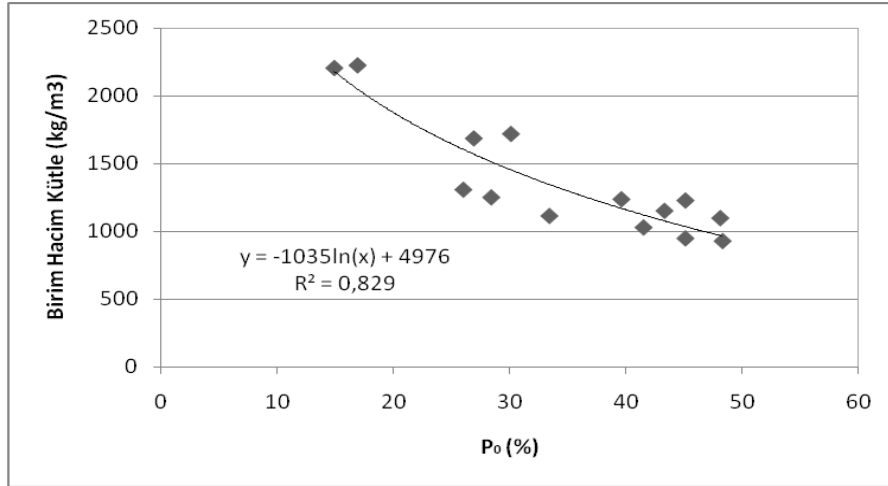
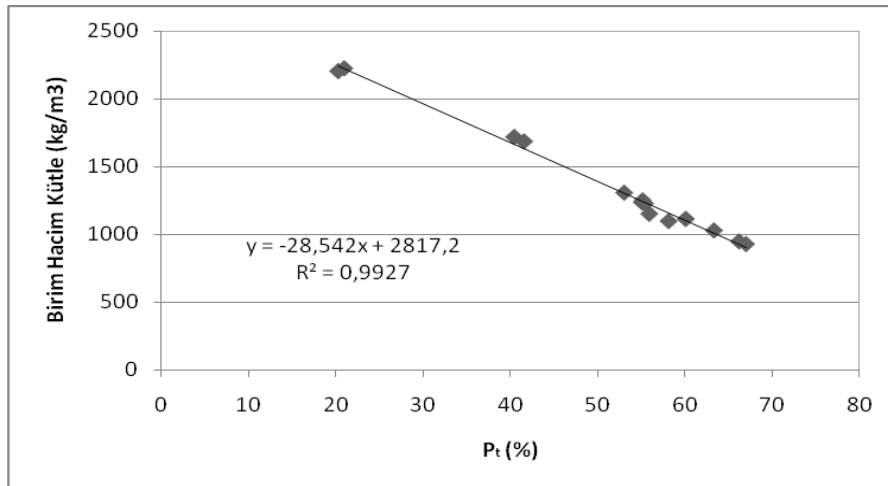
Betonun su geçirimsizliği, içerdiği birbiriyle bağlantılı (görünür) boşluk oranına bağlıdır. Beton, tuğla, kiremit gibi yapı malzemelerinin matrisleri gözle görülen ya da görülemeyen boşluk içerebilir. Bağlantısız (kapalı) boşlukların kapilarite ve su emmeye herhangi bir etkisi yoktur. Bununla birlikte bağlantılı, bağlantısız, görülebilen ya da görülemeyen boşluklar betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkiler.

Deneyler kapsamında yer alan beton örneklerinin görünür boşluk oranları (P_0) tayini 28 günlük suda kür edilmiş 100 mm'lik küp numuneler üzerinde yürütülmüştür. Ayrıca teorik (bağlantılı + bağlantısız) boşluk oranları da (P_t) hesaplanarak sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde, karışımda kullanılan hafif agregaların görünür poroziteleri ile orantılı olarak hafif beton boşluk oranlarının da arttığı, bununla birlikte I. grup örneklere göre, ince agreganın oranındaki artışın II. grup örneklerin boşluk oranlarının bir miktar azalmasına neden olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Kontrol ve hafif beton örneklerinin su emme, görünür ve teorik boşluk oranları

Karışım No	Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Doygun Yoğunluk (kg/m ³)	Su Emme Oranı (%)	Görünür Boşluk Oranı (P _i) (%)	Teorik Boşluk Oranı (P ₀) (%)	
I. Grup	KB I	2268	2204	2.9	16.9	20.93
	IKP I	1575	1248	26.2	28.4	55.18
	IGP I	1448	1026	41.1	41.5	63.38
	KP I	1274	925	37.7	48.3	67.06
	NP I	1270	1095	16.0	48.1	58.17
	KVC I	1850	1684	9.9	30.1	41.57
	GKA I	1373	1225	12.1	45.1	55.44
	II. Grup	KB II	2258	2224	1.5	14.9
IKP II		1612	1305	23.5	26.0	53.07
IGP II		1506	1111	35.6	33.4	60.14
KP II		1304	945	38.0	45.1	66.27
NP II		1323	1149	15.1	43.3	55.95
KVC II		1845	1717	7.5	26.9	40.44
GKA II		1408	1234	14.1	39.6	55.11

Hafif beton örneklerinin teorik boşluk oranları (P_t) yaklaşık % 40-67, görünür boşluk oranları (P₀) ise % 28-48 arasındadır. Hafif beton örneklerinin görünür ve teorik boşluk oranları arasındaki farklılık, görünür boşluk oranının, suyun nüfuz edemediği agrega ve çimento hamuru matrislerindeki kapalı (bağlantısız) boşlukları kapsamamasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 8. Kontrol ve hafif beton örneklerinde D – P₀ arasındaki ilişkiŞekil 9. Kontrol ve hafif beton örneklerinde D – P_t arasındaki ilişki

D-P₀ ve D-P_t oranları arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiş ve bulgular Şekil 8 ve Şekil 9'da grafiksel olarak verilmiştir. Görünür porozite - birim hacim ağırlık arasındaki ilişki, (en yüksek regresyon katsayısı için) logaritmik bir fonksiyonla tanımlanabilirken, teorik boşluk oranı - birim hacim kütle arasında güçlü doğrusal bir ilişki söz konusudur.

3.4. Hafif Beton Basınç Dayanımı (f_c)

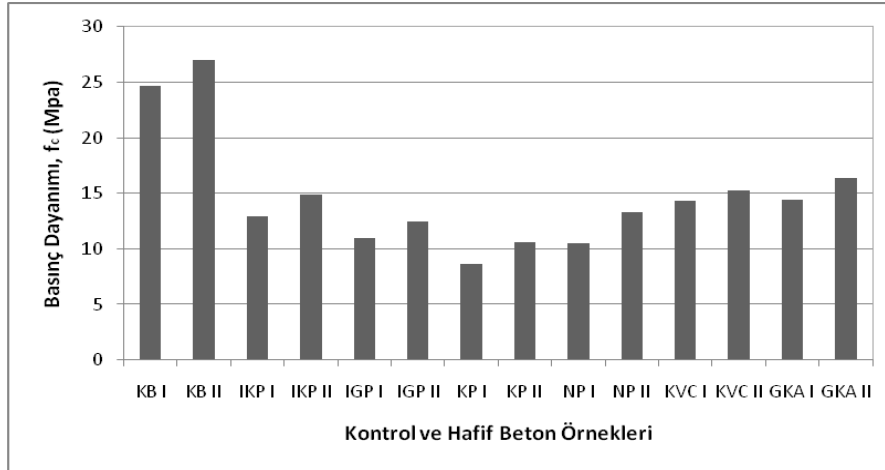
28 günlük kür süresini tamamlamış kontrol ve hafif beton örneklerinin basınç dayanımları Tablo 7 ve Şekil 10'da verilmiştir. Kontrol ve hafif beton örneklerinin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, I. grupta KVC-I ve GKA-I hafif beton örnekleri, kontrol betonu (KB-I) basınç dayanımının %58'ini, II. grupta yeralan GKA-II örneği ise, kontrol betonu (KB-II) basınç dayanımının % 61'ini sağlamıştır. Buna karşılık, her iki grupta en düşük basınç dayanımına sahip hafif beton örnekleri KP-I ve KP-II'dir. II. grup beton örneklerin karışım tasarımındaki ince agrega miktarı artışı, basınç dayanımlarını I. grup örneklerine göre nispeten iyileştirmiştir.

Ayrıca hafif beton örneklerinin 28 günlük karakteristik basınç dayanım değerleri TS EN 206-1 (2002) standardına göre yorumlanmıştır. Buna göre;

- IGP-I, KP-I, NP-I örnekleri standartta belirtilen en düşük dayanım sınıfı olan LC8,
- IKP-I, GKA-I, KVC-I, IKP-II, IGP-II, NP-II ve KVC-II örnekleri LC12,
- GKA II örneği LC16 basınç dayanım sınıfındadır.

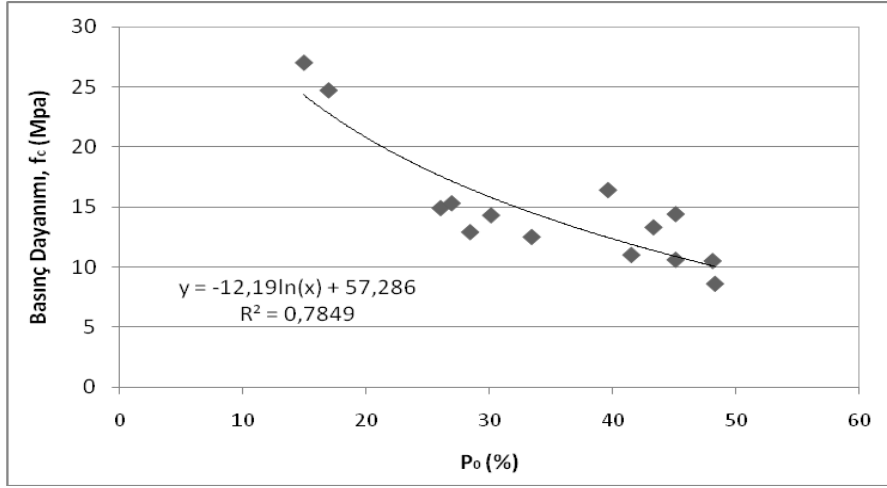
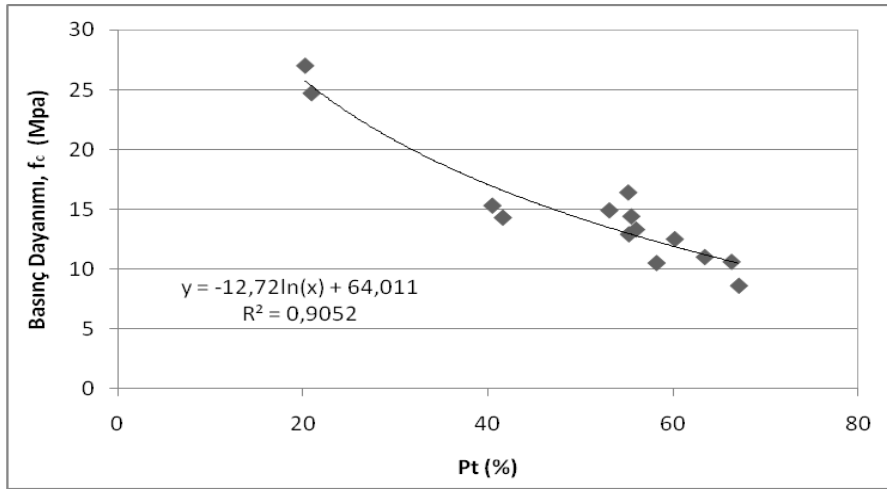
Tablo 7. Hafif betonların basınç dayanım sınıflaması ve 28 günlük hafif beton örneklerinin ortalama basınç dayanımları (TS EN 206-1).

Hafif Betonların Basınç Dayanım Sınıfı (TS EN 206-1)															
Basınç Dayanım Sınıfı (Silindir)								LC8	LC12	LC16	LC20				
28 Günlük Karakteristik Basınç Dayanımı – $f_{ck, sil}$ (MPa)								8	12	16	20				
Grup	I							II							
Örnek	KB	IKP	IGP	KP	NP	KV	GK	KB	IKP	IGP	KP	NP	KV	GK	
$f_{c, sil}$ (MPa)	24.7	12.9	11.0	8.6	10.5	14.3	14.4	27.0	14.9	12.5	10.6	13.3	15.5	16.4	



Şekil 10. 28 günlük kontrol ve hafif beton örneklerinin basınç dayanımları

Boşluk oranı, gözenek büyüklüğü ve dağılımı malzemelerin basınç dayanımına etki eden önemli parametrelerden birisidir. Bu nedenle, sabit çimento dozajı ve s/ç oranı koşullarında, 28 günlük hafif beton örneklerinin basınç dayanımları (f_c) ile P_0 ve P_t arasındaki ilişkiler de deneysel bulgulara dayanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12 incelendiğinde, $f_c = f(P_0)$ fonksiyonunda regresyon katsayısı 0.78 iken $f_c = f(P_t)$ fonksiyonunda 0.91'dir.

Şekil 11. 28 günlük hafif beton örneklerinde $f_c - P_0$ ilişkisiŞekil 12. 28 günlük hafif beton örneklerinde $f_c - P_t$ ilişkisi

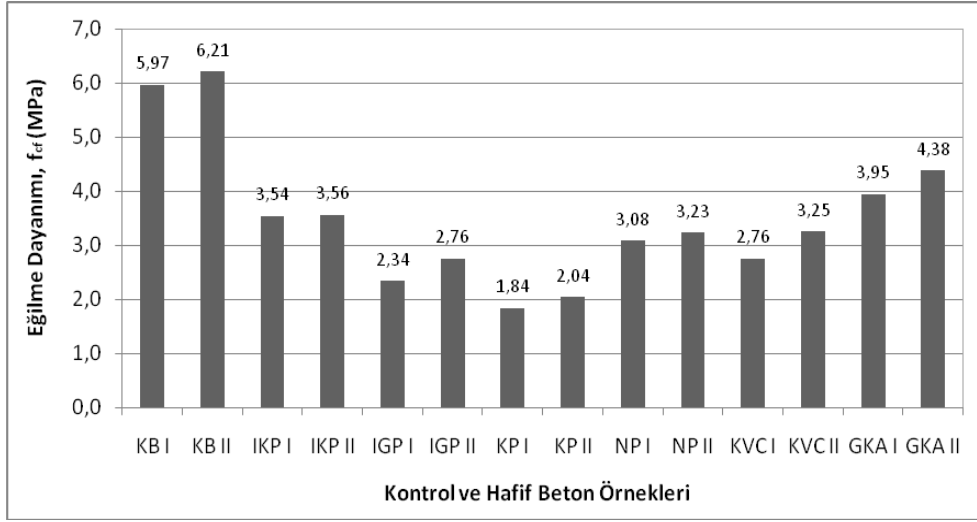
Özellikle yüksek regresyon katsayısına sahip $f_c - P_t$ ilişkisi, hafif betonların teorik (toplam) boşluk oranlarının basınç dayanımı değerleri üzerine olan etkinliğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Hemen tüm hafif agrega türlerinde etüv kuru tane yoğunluğu ve dolayısıyla gerçek porozite değerleri beton teorik boşluk oranına güçlü biçimde etki etmiştir. Bununla beraber, GKA'nın KVC agregasından daha yüksek gerçek porozite değeri değerine, dolayısıyla bu agrega ile üretilen beton örneklerinin de daha yüksek görünür ve teorik boşluk oranlarına sahip olmalarına karşılık, en yüksek beton basınç dayanımlarını sağlamıştır. Bu durum, GKA'nın KVC agregasına göre daha küçük gözenek boyutuna ve daha homojen gözenek dağılımına sahip olmasına dayandırılabilir.

3.5. Hafif Beton Eğilme Dayanımı (f_{cf})

28 günlük kontrol ve hafif beton örneklerinin eğilme dayanımları Tablo 8 ve Şekil 13'de verilmiştir. Kontrol ve hafif beton örneklerinin eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, I. grupta GKA-I ve II. grupta GKA-II hafif beton örnekleri, kontrol betonu (KB-I ve KB-II) eğilme dayanımlarının sırasıyla % 66 ve %70'ini sağlamıştır. Buna karşılık, her iki grupta en düşük eğilme dayanımına sahip hafif beton örnekleri yine KP-I ve KP-II olmuştur.

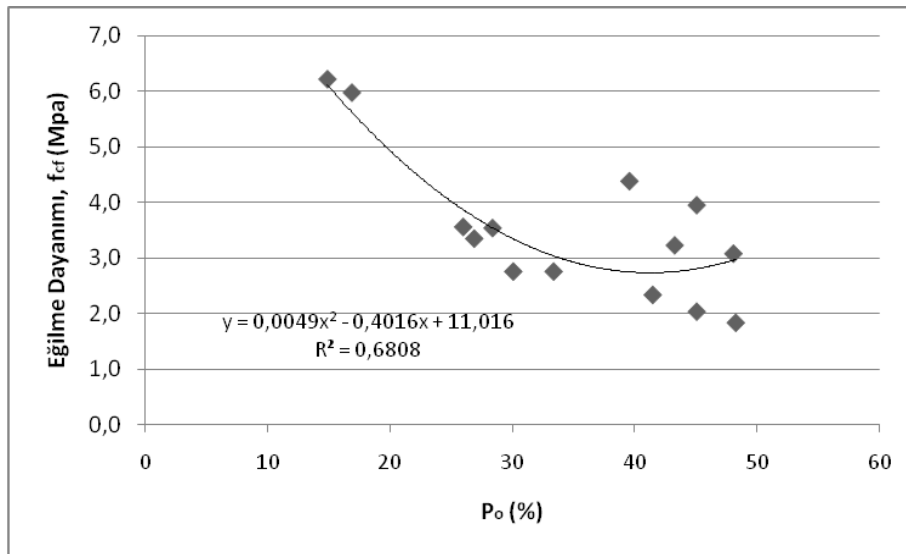
Tablo 8. 28 günlük kontrol ve hafif beton örneklerinin ortalama eğilme dayanımları (TS EN 206-, 2002).

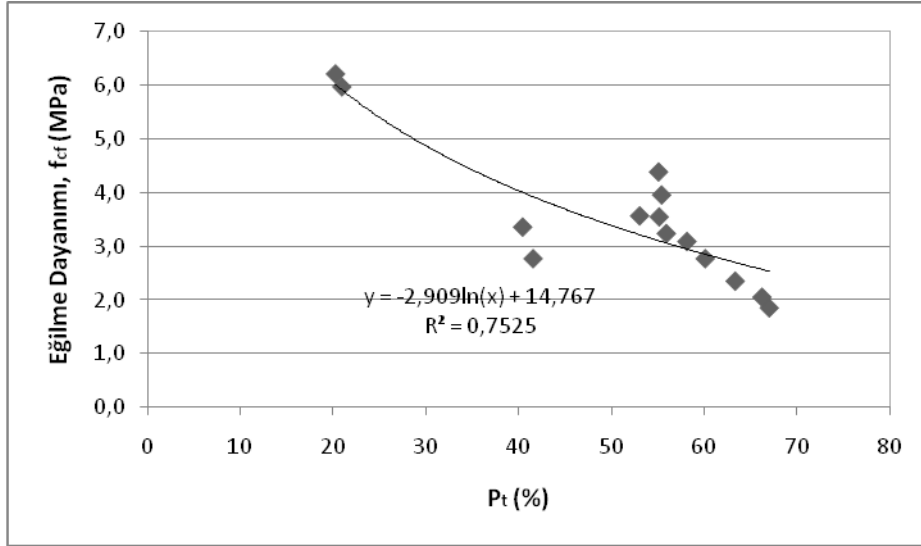
Kontrol ve Hafif Beton Örneklerinin Eğilme Dayanımları (MPa)														
Grup	I							II						
Örnek	KB	IKP	IGP	KP	NP	KV	GK	KB	IKP	IGP	KP	NP	KV	GK
f_{cf} (MPa)	5.97	3.54	2.34	1.84	3.08	2.76	3.95	6.21	3.56	2.76	2.04	3.23	3.35	4.38



Şekil 13. 28 günlük kontrol ve hafif beton örneklerinin eğilme dayanımları

Basınç dayanımında olduğu gibi, sabit çimento dozajı ve s/ç oranı koşullarında, 28 günlük hafif beton örneklerinin eğilme dayanımları (f_{cf}) ile P_0 ve P_t arasındaki ilişkiler de deneysel bulgulara dayanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. f_{cf} - P_0 ve f_{cf} - P_t arasındaki ilişkilerde regresyon katsayıları sırasıyla 0.68 ve 0.74 olup, güvenilir bir tahmine yönelik eşitlik önermek için düşüktür (Şekil 14 ve Şekil 15). Bununla beraber, diğerine göre yüksek regresyon katsayısına sahip olan $f_{cf} = f(P_t)$ fonksiyonu daha tutarlıdır.

Şekil 14. 28 günlük hafif beton örneklerinde f_{cf} - P_0 ilişkisi



Şekil 15. 28 günlük hafif beton örneklerinde f_{ct} - P_t ilişkisi

Diğer hafif agregaların bir kısmından daha yüksek teorik boşluk oranına sahip olmasına karşın, hafif beton örnekleri içerisinde en yüksek eğilme dayanımı değerlerini GKA ile üretilen örnekler sergilemiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi bu durum da, GKA'nın küçük gözenek boyutu ve homojen gözenek dağılımı ile ilişkilendirilebilir.

4. Sonuçlar

Hafif agregaların görünür ve gerçek porozite değerleri, etüv kuru tane yoğunluğunu, bu agregalar ile üretilen betonların boşluk oranlarını ve dolayısıyla hafif betonların fiziko-mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Bu çalışmada, farklı porozite değerlerine sahip doğal ve yapay hafif agregalarla sabit çimento dozajı ve s/ç oranı koşullarında üretilen hafif betonların görünür ve teorik boşluk oranları belirlenerek, sertleşmiş betonun birim hacim kütlesi, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerine etkileri araştırılmıştır. Tartışılan bulgular aşağıda özetlenmiştir:

-Hafif agregaların gerçek porozite değerleri ile hafif betonların birim hacim kütleleri uyumludur. En düşük birim hacim kütleyle sahip hafif beton örnekleri ($925-945 \text{ kg/m}^3$), en yüksek gerçek porozite (% 65-71) ve en düşük etüv kuru tane yoğunluğuna ($0.709-0.855 \text{ g/cm}^3$) sahip KP agregalarından üretilmiştir. Buna karşın en yüksek birim hacim kütleyle sahip hafif beton örnekleri de ($1684-1717 \text{ kg/m}^3$), en yüksek gerçek porozite (% 28-37) ve en yüksek etüv kuru tane yoğunluğuna ($1.778-2.021 \text{ g/cm}^3$) sahip KVC agregalarından elde edilmiştir.

-Hafif beton örneklerinin boşluk oranları, hafif agregaların görünür poroziteleri ile orantılı olarak artken, ince agrega oranındaki artış nedeniyle II. grupta yer alan örneklerin boşluk oranları bir miktar azalmıştır.

-Hafif beton örneklerinde görünür ve teorik boşluk oranları ile birim hacim kütle, basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler istatistiksel analizler yardımıyla araştırılmış ve eşitlikler önerilmiştir. Hafif betonların birim hacim kütle ve basınç dayanımları ile teorik boşluk oranı arasındaki korelasyonlar, görünür boşluk oranı ile elde edilenlerden daha güvenlidir.

-Doğal hafif agregalar ile üretilen hafif betonlarda teorik boşluk oranları artışına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Buna karşılık, KVC agregalarına göre daha yüksek görünür ve teorik boşluk oranına sahip GKA ile üretilen betonların basınç dayanımları, KVC agregaları ile üretilen örneklerden daha yüksektir. Bu durum, GKA'nın KVC agregasına göre daha küçük gözenek boyutuna ve daha homojen gözenek dağılımına sahip olmasına dayandırılmıştır.

-Beton görünür ve teorik boşluk oranları ile eğilme dayanımları arasında deneysel verilerin istatistiksel analizlerine dayanan ilişkilerin regresyon katsayıları düşüktür. Bununla birlikte, görünür boşluk oranına göre, teorik boşluk oranı – eğilme dayanımı arasında daha iyi bir korelasyon mevcuttur. Bu duruma dayanarak, betonun teorik (toplam) boşluk oranı arttıkça, eğilme dayanımının logaritmik bir fonksiyona bağlı olarak azaldığı söylenebilir. Ayrıca, diğer hafif agregaların bir kısmından daha yüksek teorik boşluk oranına sahip olmasına karşın, en yüksek eğilme dayanımı değerlerini GKA ile üretilen örneklerin sergilemesi de, GKA'nın küçük gözenek boyutu ve homojen gözenek dağılımı ile ilişkilendirilebilir.

Kaynaklar

Ateş, E., 2000. Styropor Hafif Betonun ve Betonarme Çatı Plak Elemanları Üzerine Araştırma. Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.(yayınlanmamış)

Chandra, S., Berntsson L., 2002. Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology, and Applications. Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden Noyes Publications William Andrew Publishing Norwich, New York, U.S.A., 409 S.

Göлтаş Kalite Kontrol Laboratuvarı, 2007. Aylık (Kasım) Çimento Analiz Sonuçları, Isparta. (yayınlanmamış)

Sarkar, S., L., Chandra, S., Berntsson, L., 1992. Interdependence of Microstructure and Strength of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Cement and Concrete Composite, 14, 239–248.

Lo, T.Y., Cui, H.Z.; Tang, W.C., 2007. The Effects of Aggregate Properties on Lightweight Concrete, Building and Environment, 42(8), 3025–3029. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.031.

Lo, T.Y.; Cui, H.Z., Tang, W.C. Leung, W.M., 2008. The Effect of Aggregate Absorption on Pore Area at Interfacial Zone of Lightweight Concrete. Construction and Building Materials 22, 623–628.

TS 699, 2009. Doğal Yapı Taşları-İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 206-1, 2002. Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 1097-6, 2002. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. TSE Yayınları, Ankara.

TS 3524, 1980. Yüksek Fırın Cüruf Agregalarında Süngerimsi ve Camsı Tane Oranı Tayini. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 3526, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu. TSE Yayınları, Ankara.

TS 3530 EN 933-1, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Eleme Metodu. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 12390-1, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 12390-2, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 12390-3, (2002). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. TSE Yayınları, Ankara.

TS EN 12390-5, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.

TS EN 12390-7, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini. TSE Yayınları, Ankara.