

SİLİS DUMANI KATKILI TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Salih YAZICIOĞLU, Nusret BOZKURT

Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, ELAZIĞ
E-mail: syazicioglu@firat.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, mineral katkı olarak silis dumani (SD) ve agrega olarak pomza taşı kullanılarak elde edilen taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, basınç dayanımı, yarımada çekme dayanımı ve ultrasonik hız geçirgenlik (USG) deneyleri 3, 7, 14 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında ince agrega olarak nehir kumu, kaba agrega olarak ise pomza taşı kullanılmıştır. SD ağırlıkça CEM I 42.5 N çimentosu ile %10 oranında yer değiştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre silis dumani katkılı beton (SDB) numunelerin her yaşta kontrol betonuna (KB) göre daha iyi dayanım özellikleri sergilediği görülmüştür. KB numuneleri ilk yaşlarda SDB numuneleri ile benzer özellikler sergilerken özellikle 7 günlük kür süresinden sonra SDB numunelerinde belirgin dayanım artışı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler - Taşıyıcı hafif beton, Pomza taşı, Silis dumani.

THE INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH SILICA FUME ADMIXTURE

ABSTRACT

This paper reports results of a study conducted to evaluate the investigation of the mechanical properties of lightweight concrete made with pumice as aggregate and silica fume (SD) as mineral admixture. In the study, the tests of compressive strength, split tensile strength and ultrasonic pulse velocity were applied to the samples whose ages are 3, 7, 14 and 28 days. Pumice stone was used as coarse aggregate and natural sand as fine aggregate in specimens prepared. SD was replaced with 10 % of CEM I 42.5 N by weight. According to the outputs of the study it was observed that the strength properties of concrete specimens (SDB) prepared with SF is better than control concrete (KB) specimens. While in the first days the control specimens showed similar properties with the SDB. After 7 days the SDB specimens showed higher strength.

Key words - Structural lightweight concrete, Pumice stone, Silica fume.

1. GİRİŞ

Bir özel beton türü olan taşıyıcı hafif beton, özellikle son yıllarda yapısal amaçlar için kullanılmaktadır. Günümüzde taşıyıcı hafif betonlar özellikle bir yapının ölü yükünün ve kullanılacak betonarme yapı elemanlarının ağırlıklarının azaltılmasında kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte özellikle yüksek yapıların kullanım alanlarının ve açıklıklarının artırılmasında etkin rol oynar [1]. Aynı

zamanda taşıyıcı hafif betonlar; duvar, panel ve blokla inşasında, çatı katı döşemelerinde, köprü açıklıklarında, yapımlı beton ünitelerinde çoğunlukla kullanılır ve özellikle deprem bölgelerinde yapılar inşa etmek için tercih edilir [2]. Sunduğu bu tür teknik, ekonomik ve çevre avantajlarından dolayı çok yönlü bir malzemedir [3]. Taşıyıcı hafif beton üretiminin bilinen en yaygın metodu boşluksuz hafif agrega kullanmaktır. Beton niteliği üzerinde agrega özelliklerinin etkisi bir çok araştırmacı tarafından

incelenmiştir [4,5,6]. Yang ve Huang [7], beton basınç dayanımının esas olarak agrega hacmi ve özellikleri tarafından etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Lydon [8], bazı hafif agregalar için beton basınç dayanımının agrega kütlesine bağlı olduğunu ve beton yoğunluğu ile artış gösterdiğini işaret etmiştir. Topçu [9], Al-Khaiat ve Haque [10] çalışmalarında hafif ağırlıklı agregaların hava boşlukları sayesinde bu malzemeyle üretilmiş betonun daha yüksek dayanım/ağırlık oranına, daha iyi yarma dayanımı, yüksek ses yalıtımı özelliklerine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Buna ek olarak Topçu [9], Yaşar ve Diğ. [11], hafif agrega kullanılmasıyla yapının ölü ağırlığının azalacak demir donatı miktarının azalacağını ortaya koymuşlardır. Günümüzde deprem riskinin artması da hafif betona olan ilgiyi artırmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Elazığ yöresinden elde edilen pomza taşı ve silis dumanı ile birlikte kullanılarak elde edilen taşıyıcı hafif betonların mekanik özelliklerini araştırmaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler

Çalışmada kullanılan malzemelerden çimento Elazığ Çimento Fabrikasından temin edilmiş olup TS EN 197-1-1999'de 42,5 N sınıfına girmektedir. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.10 gr/cm^3 dir. Taşıyıcı hafif betonun geliştirilmesi için kullanılan silis dumanı ise Elazığ Eti Elektro Metalurji A.Ş.'nden temin edilmiştir. Çalışmada kaba agrega olarak pomza taşı, ince agrega olarak ise özgül ağırlığı 2.72 gr/cm^3 ve su emme miktarı %10 olan nehir kumu kullanılmıştır. Bu malzemelere ait özellikler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan çimento ve silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik İçeriği	Çimento(%)	SD (%)
Çimento	21.12	91
Silis dumanı	5.62	0.58
İnce kum	3.24	0.24
Kaba agrega	62.94	0.71
Su/Çimento oranı	2.73	0.33
Kaba agrega /Agrega	1.79	1.06
İnce kum/Agrega	1.78	1.84
Kuru birim ağırlığı (kg/m^3)	3382	-
Özgül Ağırlık	3.10	2.20

Tablo 2. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Çalışmada kullanılan elek aralıkları	Pomza özellikleri
Kum : 0-5 mm,	Kuru bir hac. ağı. (gr/cm^3): 1.29
Orta Sınıf: 5-10 mm,	Su Emme Mik. (%): 22.36
İri Sınıf : 10-20 mm.	Los Angl. (500 dev. %): 42
	Basınç dayanımı (N/mm^2): 11.30

2.2. Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanışı

Pomza taşı ve silis dumanı kullanılarak elde edilen taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için kontrol betonu (KB) ve silis dumanı katkılı beton (SDB) olmak üzere 2 tip beton serisi hazırlanmıştır. Tüm beton serilerinde aynı elek aralıkları kullanılmış olup çimento dozajı 310 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Mineral katkı olarak kullanılan silis dumanı portland çimentosu ile ağırlık olarak % 10 oranında yer değiştirilerek karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca çalışmada tüm beton serilerinde çökme değeri sabit tutulmuştur ($7.5 \pm 1.5 \text{ cm}$).

Çalışmada USG ve basınç dayanımı deneyleri için $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ ölçülerindeki küp numune kalıpları kullanılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyi için ise $150 \times 300 \text{ mm}$ ölçülerindeki silindirik numune kalıpları kullanılmıştır. Beton karışımları mikserde hazırlanıp, standartlarda verilen öneriler de dikkate alınarak kalıplara yerleştirilmiştir. Hafif agregalar konusunda daha önceden yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak karışımların hazırlanmasında normal betonlarınkinden farklı bir yol izlenmiştir. Öncelikle, ince kum, karışım suyunun yarısı ve çimento yaklaşık 2-3 dakika karıştırılıp daha sonra karışıma kaba agrega sınıfları ilave edilerek 10-12 dakika daha karıştırılarak beton karışımları hazırlanmıştır [2]. Pomza taşının boşluklu yapısının diğer agregalardan daha fazla olduğu bilindiğinden uniform bir karışım elde etmek amacıyla çalışmada böyle bir karışım yöntemi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlar kübik ve silindirik kalıplara aşamalı olarak şişenip yerleştirildikten sonra laboratuvar koşullarında 1 gün saklanıp kalıplar sökülerek belirlenen yaşlarda su kürüne tabi tutulmuştur. Hazırlanan beton numunelerin karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Beton karışım oranları

Beton karışımı	KB (Kg/m^3)	SDB (Kg/m^3)
Portland çimentosu CEM-1	310	279
Silis dumanı	-	31
İnce kum	780	780
Kaba agrega (5-10 mm)	360	360
Kaba agrega (10-20 mm)	490	490
Su/Çimento oranı	0.65	0.67
Kaba agrega /Agrega	0.52	0.52
İnce kum/Agrega	0.48	0.48
Kuru birim ağırlığı (kg/m^3)	190	189

2.3. Uygulanan Deneyler

2.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi 3'er adet $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ boyutlarındaki küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3'e göre yapılmıştır.

[12]. Belirlenen beton yaşlarına ulaşan numuneler 3000 kN yükleme kapasitesine sahip otomatik kontrollü preste kırılarak dayanım değerleri bulunmuştur. Basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen veriler ışığında grafik ve şekiller elde edilmiştir.

2.3.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde hazırlanan silindirik numuneler üzerinde TS EN 12390-6'da verilen bilgiler ışığında gerçekleştirilmiştir [13]. Numuneler, kalıplardan dolayı yüzeylerinde oluşan çapaklar temizlenerek prese yanal olarak yerleştirilmişlerdir. Deney numunelerinin pres başlıklarına temas edecek olan yüzeyleri boyunca kontraplak çitalar ve üste yerleştirilen çita üzerine de yükün tek noktadan ve üniform yayılması için demir levha yerleştirilmiştir. Daha sonra numune yüklemeye tabi tutularak yarmada çekme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

2.3.3. Ultrasonik Ses Geçirgenlik (USG) Deneyi

Ultrasonik test cihazı ile betonun içerisine gönderilen sesüstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan sesüstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir [14].

Beton numunenin bir yüzeyinden içeriye gönderilen sesüstü dalganın diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = (S / t) 10^6 \quad (II.1)$$

Burada;

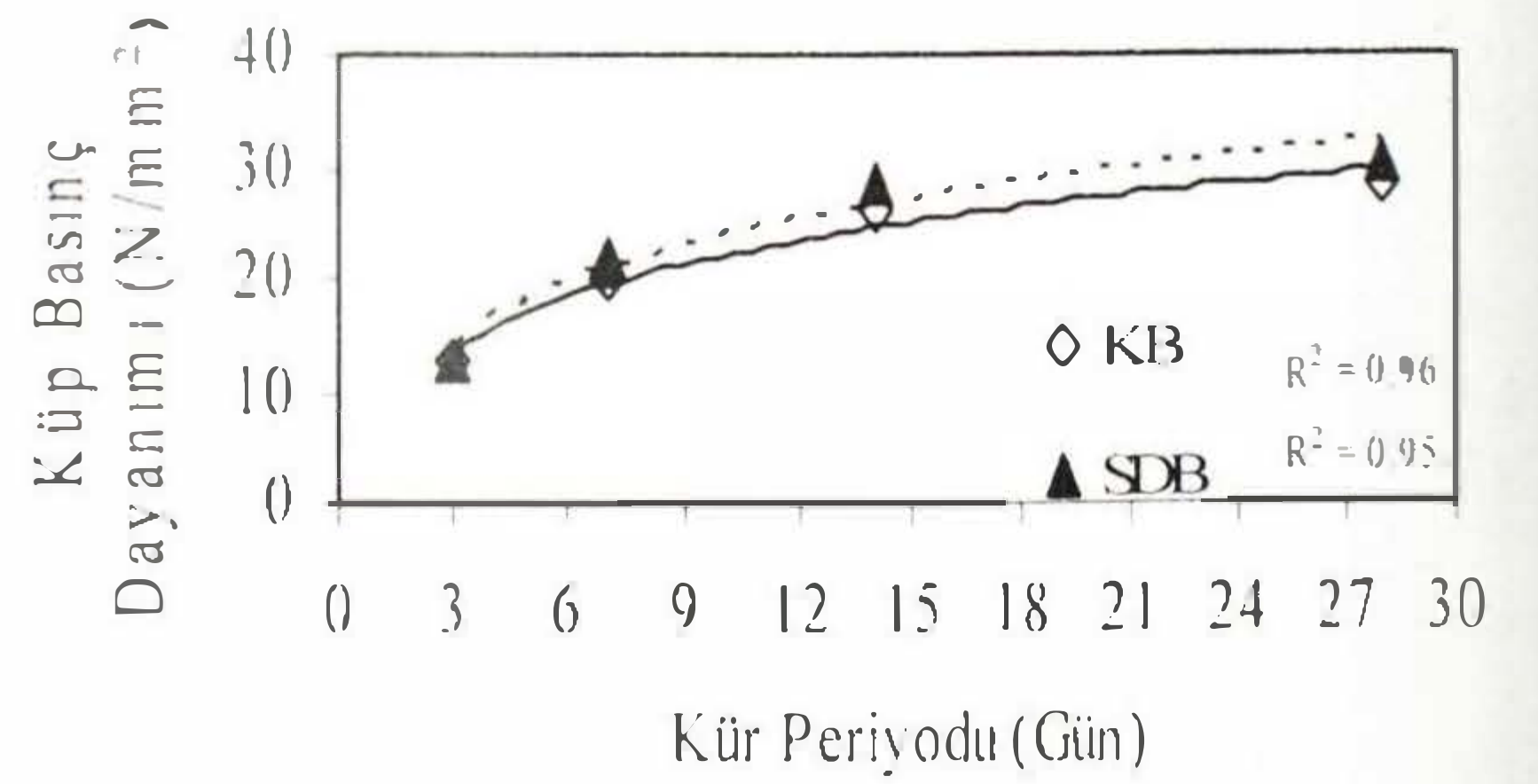
- V Sesüstü dalga hızı km/sn,
- S Beton numunenin sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe m,
- t Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman mikrosaniye [14,15].

USG deneyi için hazırlanan küp numuneler 3, 7, 14 ve 28 günlük yaşlara ulaştıklarında kür tankından çıkarılarak dinlendirilmiş, yüzeylerindeki kireç ve benzeri maddeler temizlenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numune yüzeylerine ultrasonik test cihazının dalga alıcı-verici uçlarının tam temas etmesi sağlanmıştır. Numunelerin düzgün yüzeylerinden okumalar yapıp ortalama değerler kaydedilmiştir.

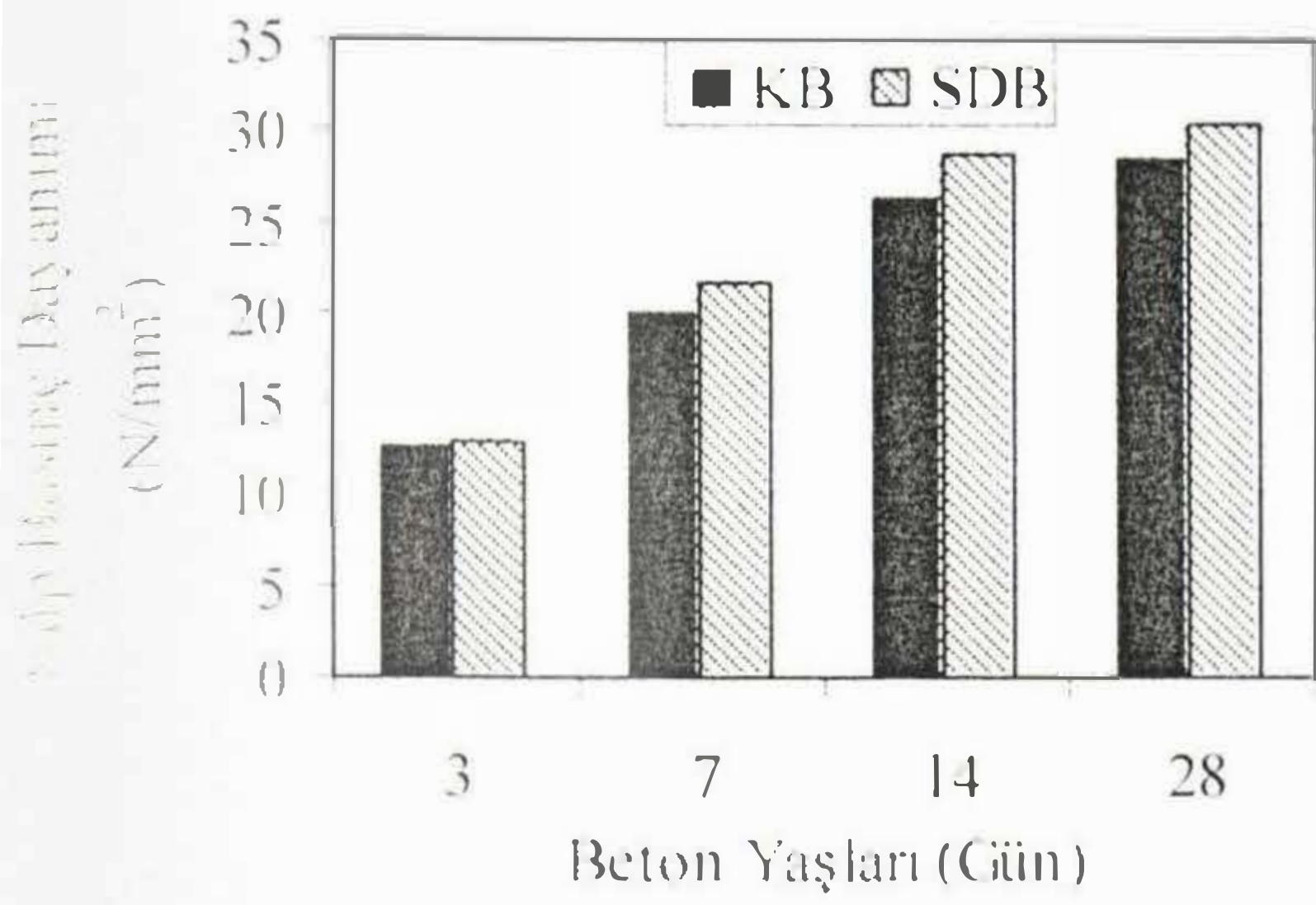
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

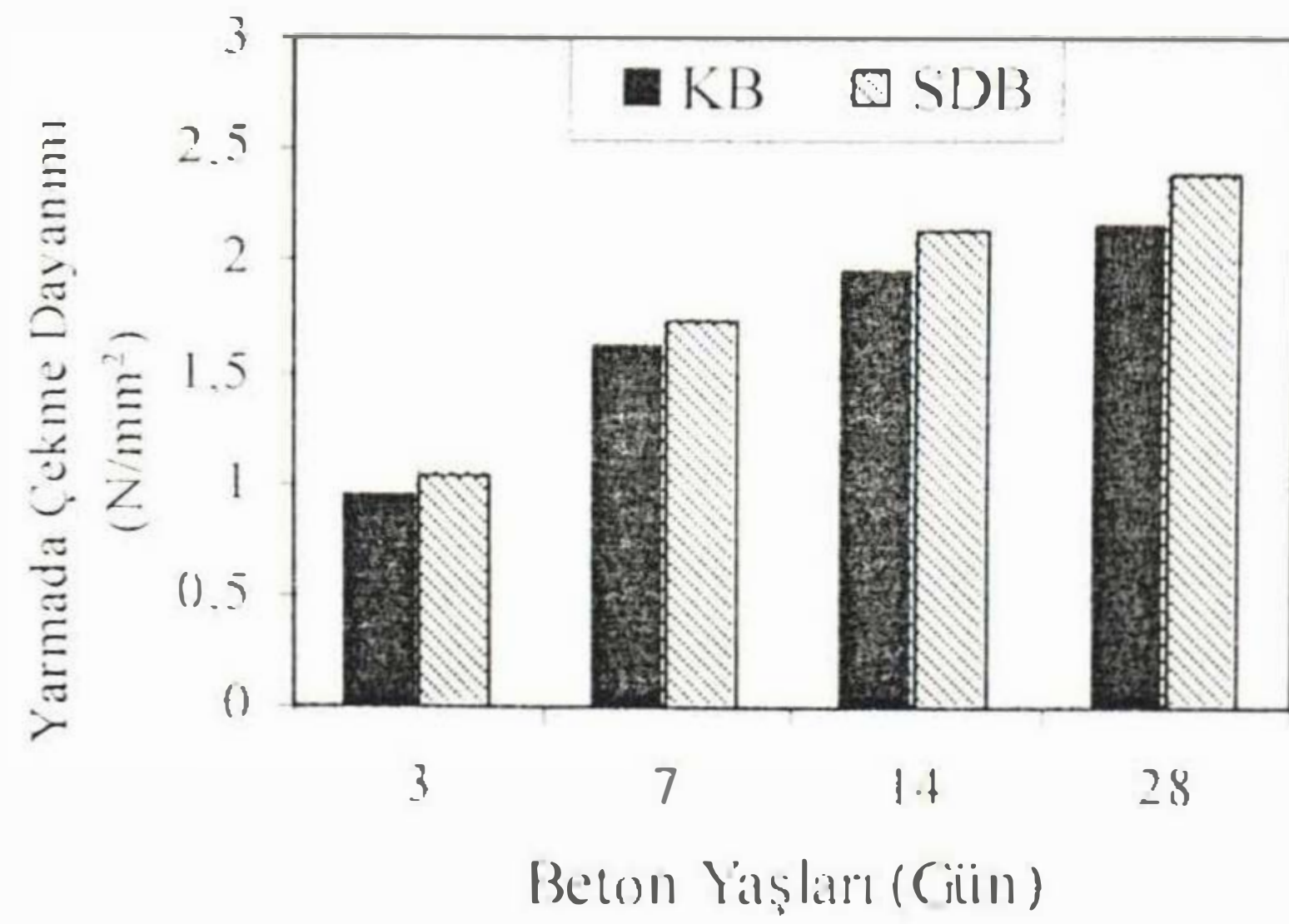
Pomza taşı ve silis dumanı ile hazırlanan beton numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Hazırlanan beton serilerinin basınç dayanım değişimleri Şekil 3.1-3.2'de verilmiştir. Şekil 3.1 incelendiğinde her yaşta beton serilerinin basınç dayanımında artış meydana geldiği görülmektedir. Beton serileri erken yaşlarda benzer basınç dayanımı özelliklerine sergilemelerine rağmen, özellikle 7 günlük yaş ile birlik dayanımlarda farklılıklar gözlenmiştir. 28 günlük su küresinin sonrasında en yüksek basınç dayanımı % 10 SDB numunelerinde ve bunu takiben KB numunelerinde gözlenmiştir. Puzolanik aktivasyon bakımından silis dumanının erken yaşlarda dahi etkili bir özellik sergilediği söylenebilir. Bu sonuç, çimento hidrasyonu boyunca serbest kalsiyum hidroksitle silis dumanının reaksiyonu bağlanabilir [16,17]. Silis dumanı ile üretilen betonların 3 günlük basınç dayanım artışı oranı, kontrol betonuna göre yaklaşık olarak % 7.5'tir. Her iki beton serilerinin 7 günlük basınç dayanımları 25 N/mm²'nin üzerinde oldu. Şekil 3.1-3.2'de görülmektedir. Taşıyıcı hafif beton için 17 N/mm² sınırın dikkate alındığında elde edilen sonuçların önemi anlaşılabilir [11]. Bununla birlikte devamlı deprem riski altında bulunan ülkemizde ortalama olarak C20 beton kullanılması gerektiği de bilinmektedir. Bu bakımdan çalışma sonuçları incelendiğinde ise KB serilerinin basınç dayanımı TS EN 206-1'e göre LC20 sınıfına girerken, SDB serilerinin basınç dayanımı LC20 seviyesindedir. Aynı zamanda C20 seviyesindeki norm dayanımlı bir betonun ağırlığı ortalama olarak 2300 kg/m³ olduğu düşünülürse bundan yaklaşık olarak % 20 daha hafif ve daha iyi niteliklere sahip taşıyıcı hafif beton üretilebileceği Tablo 3'teki ortalama birim ağırlıklı sonuçlarından görülebilir [11]. Bu sonuçlar deprem ve onarıcı etkisi açısından önemlidir.



Şekil 3.1. Kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama küp basınç dayanımı



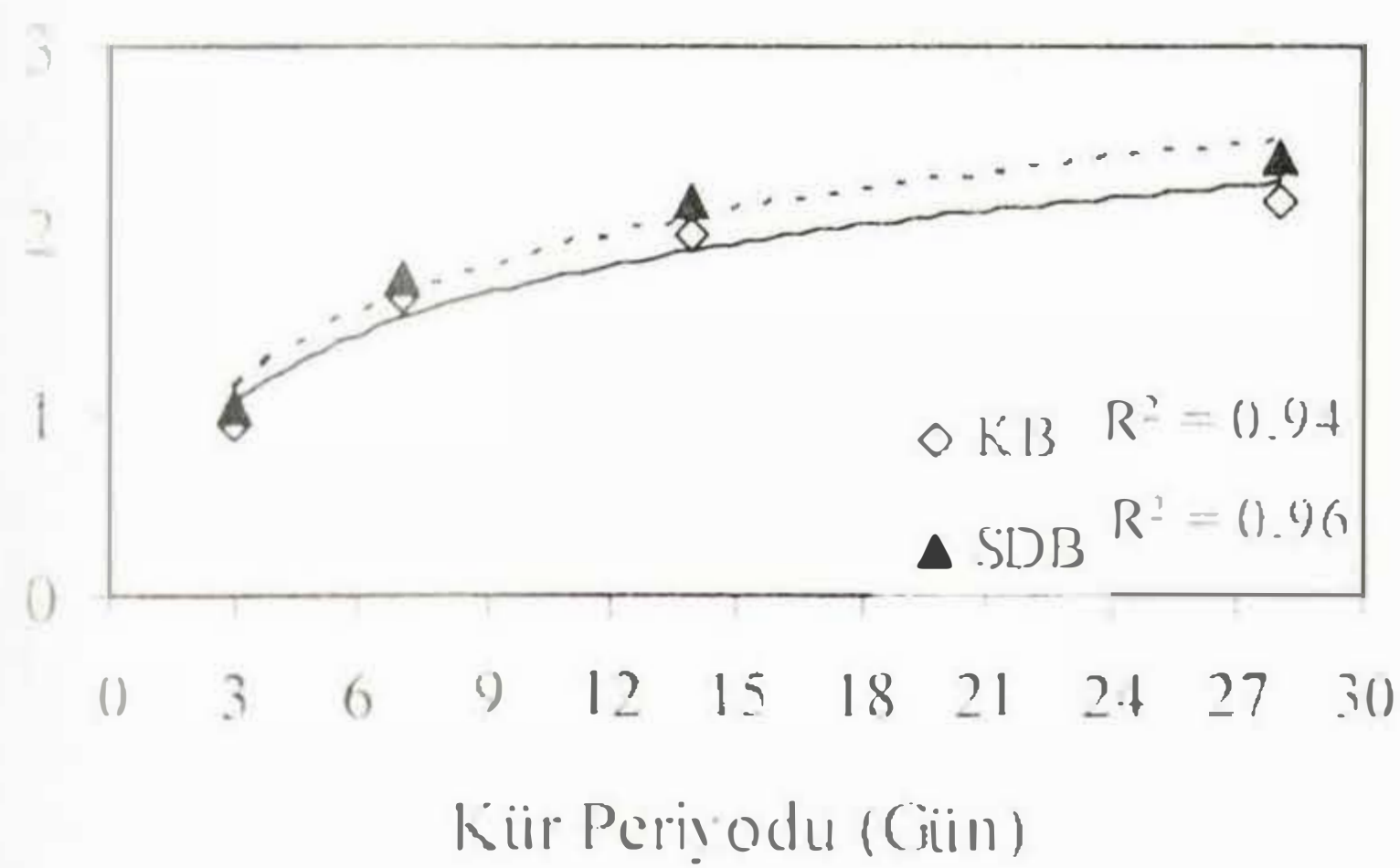
Şekil 3.3. Hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama küp dayanımı



Şekil 3.4. Hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama yarmada çekme dayanımı

Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Bu deneyde hafif agregalı beton serilerinin yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 3.3-3.4'te verilmiştir. Şekil 3.3'ten görüldüğü gibi beton serilerinin her yaşta dayanımının arttığı görülmektedir. Yarmada çekme dayanımına tabi tutulan betonlarda kırılma erken yaşlarda yüzey çatlakları oluşurken, özellikle 14 günlük su kürü sonrasında ortadan yarıma şeklinde gözlenmiştir. Erken yaşlarda kırılma erken yaşlarda agrega-harç arasında oluşurken, sonraki yaşlarında ise kaba agregada oluştuğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda da en iyi dayanımı SDB serisi göstermiştir. Her beton yaşı için iki ayrı tip beton aynı bir arada gösterildiği Şekil 3.4'te beton serilerinin aynı yaşlarda sergilediği yarmada çekme dayanımı davranışı gösterilmektedir.

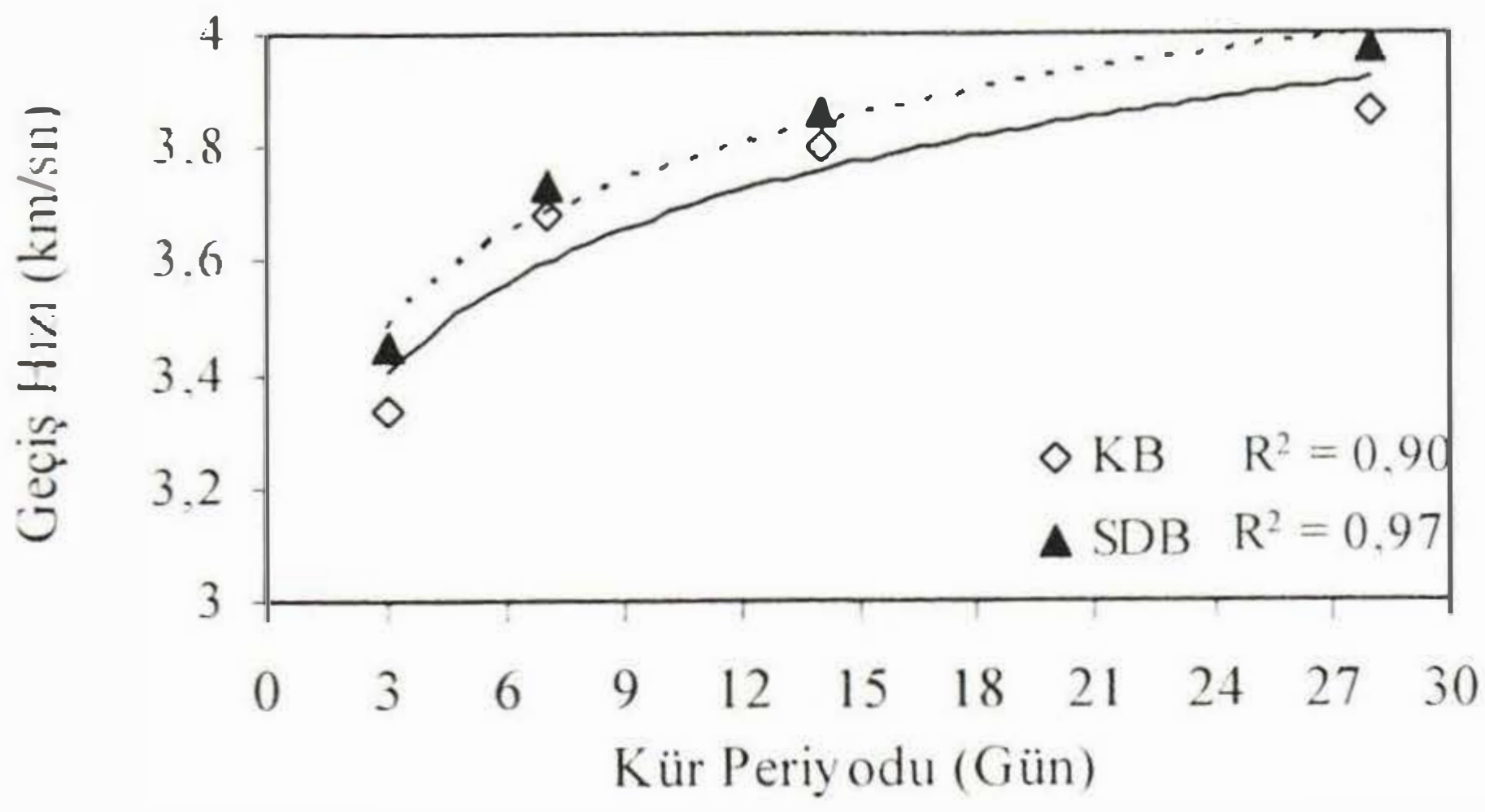


Şekil 3.3. Kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama yarmada çekme dayanımı

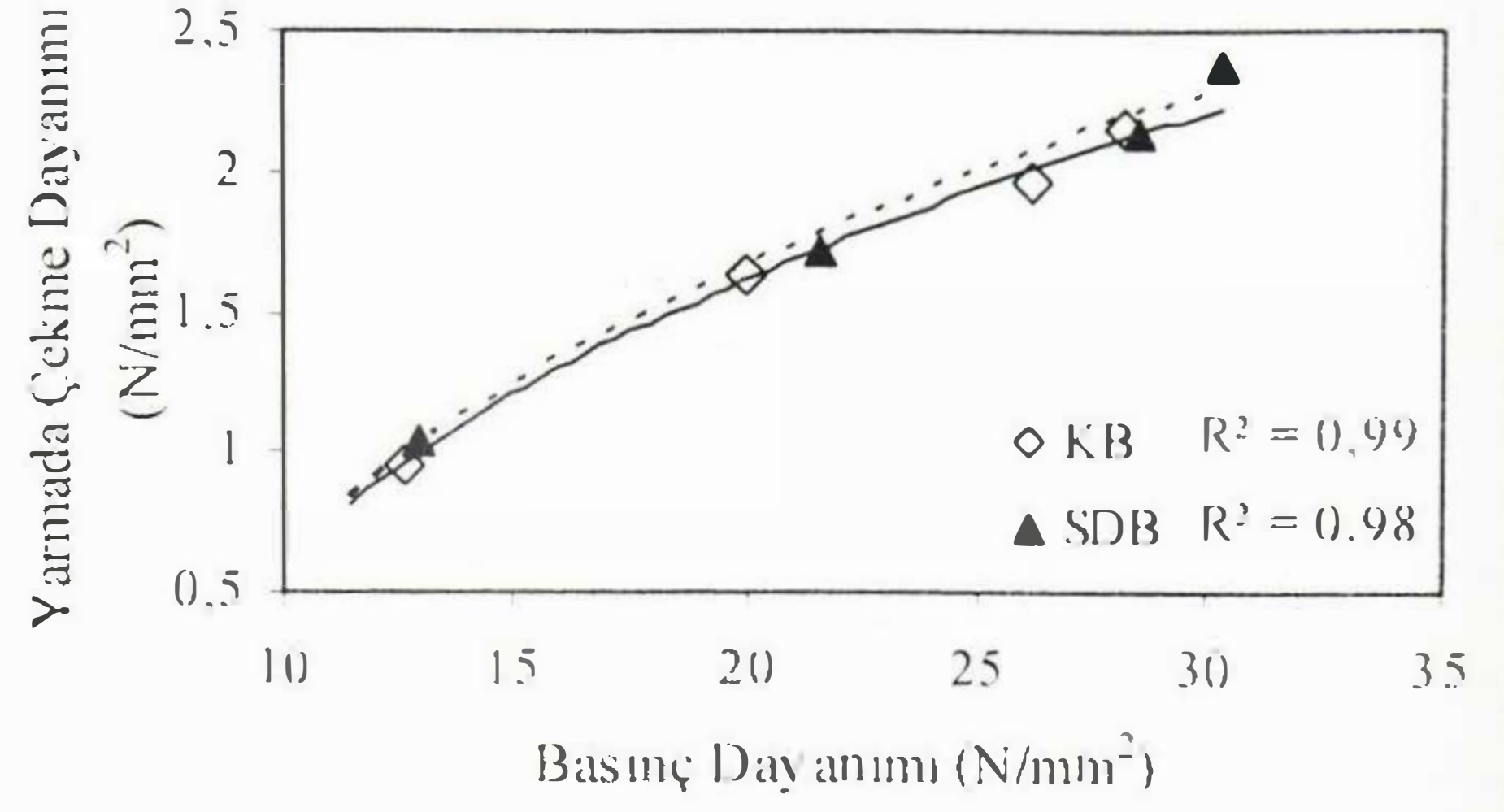
3.3. Ultrasonik Ses Geçirgenlik (USG) Deneyi

USG deneyi sonuçları incelendiğinde beton serilerinin sesüstü dalga geçiş hızlarından nasıl bir dayanım özelliği sergileyeceği konusunda genel bir yargıya varılabilir. Hazırlanan betonların (KB, SDB) sesüstü geçirgenlik hızları Şekil 3.5'te görülmektedir. Silis dumanı katkısının nitelik ve aktivasyonunun yüksek olması dolayısıyla silis dumanı katkılı betonların sesüstü dalga hızları KB'na göre daha yüksek çıkmıştır. Şekil 3.5 incelendiğinde silis dumanı katkılı beton serilerinin KB'undan daha iyi geçiş hızı özellikleri sergilediği görülmektedir. Betonun içerisinden geçen sesüstü dalga hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak, sesüstü dalganın hızı ile betonun yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, dalga hızı betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça sesüstü dalganın hızı daha küçük olmaktadır [14]. Yukarıdaki bilgiler ışığında Şekil 3.5 incelendiğinde SDB serilerinin boşluk hacminin diğer serilere göre daha az olduğu söylenebilir. Bu durum SD parçacıklarının, betonu doldurma kapasitesinin yüksek olması ile açıklanabilir. Böylece SDB serisinin daha iyi mekanik özellikler sergileyeceği görülmüştür.

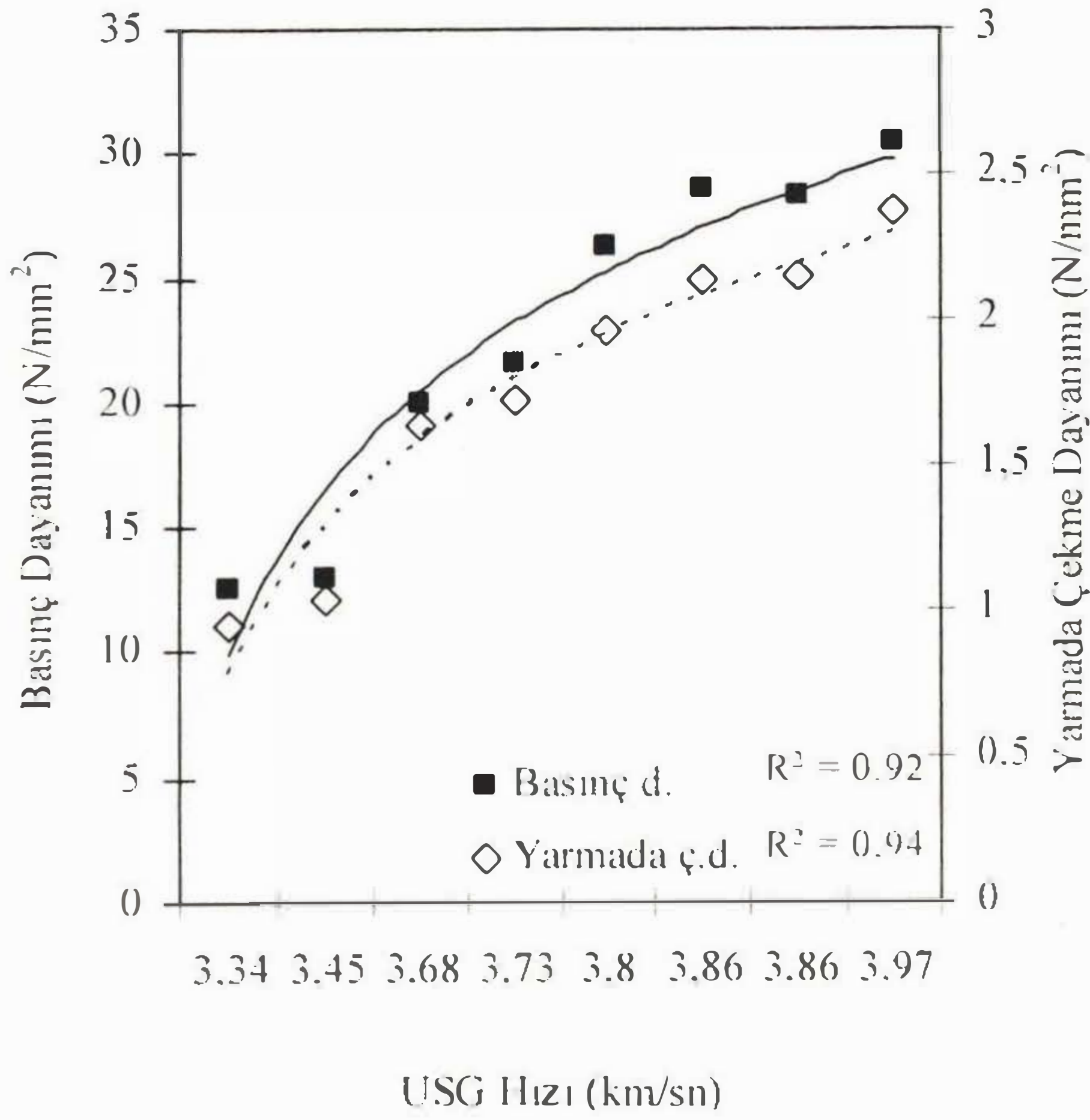
Şekil 3.6'da basınç, yarmada çekme dayanımları ve Ultrasonik ses geçirgenlik değerleri arasındaki ilişki verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi R^2 değerleri 0.90'nın üzerinde olduğundan dayanım değerleri ve ultrasonik ses geçirgenlik hızı değerleri arasında iyi bir ilişki olduğu söylenir. Dayanım değerleri arttıkça ultrasonik ses geçirgenlik hızı da artmaktadır [18].



Şekil 3.5. Hafif agregalı beton serilerinin kür periyodu-USG hızı grafiği



Şekil 3.7. Beton serilerinin basınç ve yarmada çekme dayanımını karşılaştırılması



Şekil 3.6. Basınç, yarmada çekme dayanımları ve Ultrasonik ses geçiş hızı arasındaki ilişki

3.4. Basınç ve Yarmada Çekme Dayanımının Karşılaştırılması

Şekil 3.7'de katkı ve katkısız beton serilerinin (KB, SDB) yarmada çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi beton tipine bakılmaksızın basınç dayanımı arttıkça yarmada çekme dayanımı da artmıştır. Fakat yarmada çekme dayanımındaki artış oranı basınç dayanımına göre daha az olmuştur. Bu durum basınç ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkinin lineer olmadığını gösterir [19].

4. SONUÇ

Çalışmadan elde edilen deney sonuçlarına göre Elazığ yöresinden elde edilen Pomza taşının taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. Aynı zamanda SD katkısı da beton karışımına ilave edilerek daha kaliteli beton üretimi yapılmıştır. Fakat SD'nın malzeme özelliklerinin haricinde piyasada az bulunur olması ve diğer maliyet dezavantajlarının önemli derecede üretim maliyetini arttırdığı görülmüştür. Pomza taşı ve silis dumanı katkısı ile LC25/28 sınıfında beton dayanımları elde edilmiştir. Bu sınıfta üretilecek olan taşıyıcı hafif betonlar deprem dayanımı açısından uygun sınırlar içinde olmakla birlikte hafiflik avantajıyla da depremin yıkıcı etkilerine karşı faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. Kok, S. C., Min-Hong, Z., Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research No 32, pp. 639-645, 2002.
- [2]. Sari, D., Pasamehmetoglu, A. G., The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research No 35 (5), pp. 936-942, 2005.
- [3]. Haque, M.N., Al-Khaiat, H., Kayali, O., Strength and Durability of Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, No 26, pp. 307-314, 2004.
- [4]. Giaccio, G., Rocco, C., Violini, D., Zappitelli, Zerbino, R., High-Strength Concrete Incorporating Different Coarse Aggregates, ACI Materials Journal, No 89 (1), pp. 242-246, 1992.

- [1]. Baalbaki, W., Benmokrane, B., Chaallal, O., Aitton, P.C., Influence of Coarse Aggregates on Elastic Properties of High Performance Concrete, *ACI Mater.* No 88 (5), pp. 499-503, 1991.
- [2]. Nilsen, A.U., Monteiro, J.M., Gjorv, O.E., Estimation of the Elastic Modulus of Lightweight Aggregate, *Cement and Concrete Research*, No 25 (2), pp. 276-280, 1995.
- [3]. Yang, C.C., Huang, R., A Two-Phase Model for Predicting the Compressive Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research*, No 26 (10), pp. 1567-1577, 1996.
- [4]. Hanson, F.D., *Concrete Mix Design*, Applied Science Publishers, 2nd ed., London, 1982.
- [5]. Özalp, İ.B., Semi-Lightweight Concretes Produced by Granular Slags, *Cement and Concrete Research*, No 27, pp. 15-21, 1997.
- [6]. Akhajat, H., Haque, M.N., Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Research*, No 28, pp. 859-866, 1998.
- [7]. Sar, E., Atis, C. D., Kilic, A., Gulsen, H., Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Slag and Fly Ash, *Materials Letters*, No 57, pp. 2267-2270, 2003.
- [8]. TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri- bölüm 3: Deney numunelerinde Basınç dayanımının Tayini, TSE, Ankara, 2003.
- [9]. TS EN 12390-6, Beton-sertleşmiş beton deneyleri- bölüm 6: Deney numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara, 2002.
- [10]. Erdoğan, T. Y., *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2003.
- [11]. ASTM C 597, Standart Test Method For Pulse Velocity Through Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.
- [12]. Almussalam, A.A., Beshr, H., Maslehuddin, M., Al-Moudi, O.S.B., Effect of Silica Fume on the Mechanical Properties of Low Quality Coarse Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Composites*, No 26, pp. 891-900, 2004.
- [13]. Khatri, R.P., Sirivivathnanon V., Effect of Different Supplementary Cementitious Materials on Mechanical Properties of High Performance Concrete, *Cement Concrete Research*, No 25 (1), pp. 209-220, 1995.
- [14]. Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoç, M., B., Relationship Between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for High-Volume Mineral-Admixed Concrete, *Cement and Concrete Research*, No 34, pp. 2329-2336 2004.
- [15]. Zaina, M.F.M., Mahmud H.B., Ilham A., Faizal, M., Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, No 32, pp.1251-1258,2002.