

# Kendiliğinden Sıkışan Hafif Beton Karışım Oranları, Dayanım ve Maliyet Analizi

Beton 2011 Kongresi'nden

Erhan Yoğurtcu<sup>1</sup>

Özge Andıç Çakır<sup>2</sup>

Kambiz Ramyar<sup>3</sup>

Sırrı Öner<sup>4</sup>

## Özet

Bu çalışmada, İzmir yöresi için ekonomik değeri yüksek olan İzmir-Menderes yöresi ponzası kullanılarak kendiliğinden sıkışan taşıyıcı hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kırma kireçtaşı ve ponza agregası, CEM I tipi çimento, (filler malzeme olarak) olivin tozu, hava sürükleyici ve super akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Taze beton üzerinde, yayılma çapı, T50cm yayılma süresi, V hunisi, 5dk gecikmeli V hunisi, birim hacim ağırlık ve hava içeriği deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton üzerinde birim hacim ağırlığı, 7 ve 28. gün basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneme karışımları sonucunda hava kuru birim hacim ağırlığı 1988 kg/m<sup>3</sup> ve 28 günlük 150mm ayrıtlı küp basınç dayanımı ortalama 28 MPa olan kendiliğinden sıkışan taşıyıcı hafif beton üretimi mümkün olmuştur. Çalışmanın sonucunda elde edilen beton karışımlarının maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

## 1. GİRİŞ

Türkiye, 2010 yılı verilerine göre yıllık 4.2Mt üretim kapasitesiyle toplam üretimi 19.6 Mt olan dünya ponza piyasasında lider konumdadır. Diğer önemli ponza üreticisi ülkeler, İtalya,

Şili, Ekvator, Etiyopya, Fransa, Almanya, Yunanistan, İspanya ve Amerika Birleşik Devletleri'dir [1]. Ülkemizde üretilen ponza, inşaat sektöründe ısı izolasyon amaçlı uygulamalarda kullanılmakta ve yurtdışına ihraç edilmektedir. Taşıyıcı sistemlerde kullanımı ise tercih edilmektedir.

Türk Standartlarında yapısal hafif betonun tanımı halen yürürlükte olan iki farklı metinde yer almaktadır. TS 2511 "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları"na göre taşıyıcı hafif beton, birim ağırlığı 1900kg/m<sup>3</sup>'ün altında ve 28-günlük basınç dayanımı ise 16 MPa'ın üzerinde olan betondur [2]. TS EN 206-1'e göre ise hafif beton, toplam agreganın tümü veya bir kısmı hafif agregadan imal, fırın kuru yoğunluğu 800 kg/m<sup>3</sup> ile 2000 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen betondur [3]. TS 2511 yapısal

hafif betonu tanımlarken TS EN 206-1 ise genel olarak hafif betonu tanımlamaktadır. Avrupa ülkelerinin ortak çalışmalarından yayınladıkları raporlarda, hafif beton üretimi ve karakterizasyonu konusunda oldukça fazla bilgi birikimi olduğu görülmektedir [4,5].

### Mixture Proportions, Strength and Cost Analysis of Self Compacting Concrete

In this study, self compacting concrete was produced by using İzmir-Menderes pumice which has a high economical value for İzmir region. Crushed limestone and pumice aggregates, CEM I type cement, olivin powder (as filler), air entraining agent and superplasticizer admixture were used in these mixtures. Slump-flow, T50cm, V-funnel, 5 min delayed V-funnel, unit weight and air content measurements were applied to fresh concrete mixtures. 7 and 28-day old compressive strength of hardened concrete mixtures were determined. In this study, it was possible to produce self compacting concrete with 1988 kg/m<sup>3</sup> unit weight and 28-day 150 mm cube compressive strength having 28 MPa. Finally, cost analysis of the prepared mixtures were evaluated.

<sup>1</sup>Yeni Prefabrike A.Ş., Atatürk Mah. Fatih Cad. Karakuyu / Torbalı / İZMİR - <sup>2</sup>Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova/İZMİR, ozge.andic@ege.edu.tr

<sup>3</sup>Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova/İZMİR, kambiz.ramyar@ege.edu.tr - <sup>4</sup>Pomza Export Madencilik A.Ş., Ankara Asfaltı, Kavaklıdere Bornova / İZMİR

Kendiliğinden sıkışan beton ise 80'li yılların sonunda Japonya'da geliştirilmiş olan ve başlıca kullanım sebepleri inşaat süresini kısaltmak, sık donatılı kesitlerde uygun sıkışmayı sağlamak ve gü-rültü ve ekstra işçilik gerektiren vibrasyon uygulamasına son vermek olan özel beton çeşididir. Mayıs 2005'te beş uluslararası federasyonun ortak çalışması olarak yayınlanan raporda kendiliğinden sıkışan beton, sık donatılı ve dar kesitlerde bile kendi ağırlığı ile akarak kalıpları tamamen dolduran ve tam sıkışma sağlayan özel beton çeşidi olarak adlandırılmıştır. Taze haldeki bu üstün özellikleri yanısıra sertleştiğinde yoğun ve homojen yapıda olup geleneksel betonla benzer dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmaktadır [6]. Bu raporda ayrıca, kendiliğinden sıkışan betonun tasarım prensipleri ve taze beton özellikleri ile ilgili sınıflandırmalar yer almaktadır.

Taşıyıcı sistemlerde hafif beton kullanımı, yapıların ölü yüklerini ve yanıl deprem kuvvetlerini azaltmak açısından avantaj sağlamaktadır. Düşük yoğunluğunun yanısıra, hafif betonun normal ağırlıkta betona kıyasla daha iyi izolasyon kabiliyetine sahip olduğu bilinmektedir. Yapısal hafif beton, geleneksel betona benzer şekilde karıştırılır, taşınır ve yerleştirilir. Ancak, kullanılan agregalarının düşük yoğunluğu sebebiyle betonda ayrışma meydana gelebilir. Prekast/prefabrike beton elemanların üretiminde çoğunlukla kullanılan dış vibratörler ayrışma riskini arttırabilir. Dolayısıyla, kendiliğinden sıkışan hafif betonun uygun dayanım ve dayanıklılık özellikleri ve segregasyona direnci sayesinde yukarıda bahsedilen sorunların giderilmesinde uygun bir alternatif olduğu söylenebilir.

Kendiliğinden sıkışan beton ve hafif beton ile ilgili literatürde geniş kapsamlı çalışmalar yer almasına rağmen kendiliğinden sıkışan hafif beton ile ilgili çalışmaların sayısı görece olarak azdır. Kadiroğlu [7], hafif agrega olarak ponza kullanılarak 1400 ile 1700 kg/m<sup>3</sup> aralığında ağırlığa sahip kendiliğinden sıkışan hafif beton üretmiştir. Betonun birim ağırlığı arttıkça akış, yerleşebilirlik, hava içeriği ve dayanım kazanma hızı gibi özelliklerinin azaldığı buna karşın nihai basınç ve çekme dayanımlarının arttığını belirlemiştir.

Choi vd [8], hafif agregayı %25, %50, %75 ve %100 oranlarında normal ağırlıklı agrega ile değiştirerek 1908 ile 2248 kg/m<sup>3</sup> aralığında birim hacim ağırlığa sahip yüksek dayanımlı kendiliğinden sıkışan hafif beton üretmek için çeşitli mekanik özelliklerini normal ağırlıktaki kendiliğinden sıkışan kontrol betonu ile karşılaştırmıştır. Karışımlardaki kaba hafif agrega içeriği arttıkça beklenildiği gibi basınç dayanımları azalmıştır. Karışımlarda %50'den fazla ince hafif agrega kullanıldığında

ise dayanımlarda artış gözlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca bu tür betonların yarmada çekme ve basınç dayanımları arasında oldukça güçlü bir ilişki olduğunu belirlemiştir.

Andiç-Çakır vd [9], normal ağırlıktaki kaba agrega yerine farklı oranlarda kaba hafif agrega kullanımıyla, 1547 ile 1734kg/m<sup>3</sup> aralığında birim hacim ağırlığına sahip kendiliğinden sıkışan hafif beton üreterek bunların mekanik özelliklerini kendiliğinden sıkışan normal ağırlıktaki betonlarla karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda betonların 28 günlük basınç dayanımları ile birim ağırlık değerleri arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğu, ancak, basınç dayanımında meydana gelen azalmanın, betonda meydana gelen hafiflemeye oranla daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, hafif agrega miktarındaki artışla eğilme dayanımındaki azalmanın basınç ve yarmada çekme dayanımındaki azalmaya kıyasla daha düşük mertebede olduğu belirlenmiştir. Bu davranış, hafif agrega kullanımında agrega-çimento hamuru arayerinin iyileşmesine bağlanmıştır. Kim vd (2010), benzer şekilde kendiliğinden sıkışan betonların basınç dayanımında, beton yoğunluğuna kıyasla daha fazla azalma görüldüğünü vurgulamıştır.

Bu çalışma, TÜBİTAK Kobi Ar-Ge başlangıç destek programı çerçevesinde yürütülerek 2011 yılında tamamlanan Prefabrike Hafif Aşık Kirişi ve Cephe Paneli Tasarımı, Prototip Üretimi isimli projenin hazırlık aşamasında geliştirilen kendiliğinden yerleşen yapısal hafif beton tasarımı ile taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin karşılaştırılmasını içermektedir. Kendiliğinden sıkışan özelliğe, birim hacim ağırlığı 1898 ile 1988 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen ve 28 günlük basınç dayanımı 23.7 ile 29.1 MPa arasında değişen karışımlar elde edilmiş olup birim hacim ağırlığı değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal ilişki olduğu belirlenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1 Malzemeler

#### 2.1.1 Toz Malzemeler

Bağlayıcı toz malzeme olarak, CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Filler toz malzeme olarak ise kireçtaşı tozu ve İzmir Torbalı bölgesindeki bir olivin tesisinin atığı olan, "75 mikron altı" ve "filtre" olarak adlandırılan 2 ayrı incelikte olivin tozu kullanılmıştır. Kireçtaşı tozunun özgül ağırlığı 2.7, olivin tozunun özgül ağırlığı 3.1'dir. Çimento ve olivin tozunun kimyasal özellikleri Tablo 1.1'de verilmektedir.

**Tablo 1.1** Toz malzemelerin kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	CEM I 42.5 R	Olivin Tozu
SiO <sub>2</sub>	18.59	45.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	1.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.41	5.32
CaO	63.59	1.42
MgO	1.11	44.53
Na <sub>2</sub> O	0.49	0.51
K <sub>2</sub> O	0.77	0.10
SO <sub>3</sub>	3.39	--
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	0.72
Cl	0.016	--
Kızdırma Kaybı	3.03	1.10
Serbest CaO	1.56	--

**2.1.2 Agregacı**

Çalışma kapsamında 0-5mm kırma kireçtaşı agregası ve 6-20mm Menderes yöresi ponzası kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan agregaların elek analizleri Tablo1.2’de, fiziksel özellikleri ise Tablo1.3’de verilmiştir.

**2.1.3 Kimyasal Katkı**

Çalışma kapsamında hiper akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilat esaslı bir katkı ve hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.

**2.2 Beton Karışım Oranları**

Çalışma kapsamında 11 adet kendiliğinden sıkışan hafif beton ve 1 adet kontrol amaçlı kendiliğinden sıkışan normal beton olmak üzere toplam 12 karışım hazırlanmıştır. Kendiliğinden sıkışan hafif betonlar KH serisi, kendiliğinden sıkışan normal beton ise KN olarak adlandırılmıştır. Karışım miktar ve oranları Tablo 1.4’de, taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları ise Tablo1.5’te görülebilir.

Karışım hesaplarında, agreganın 0.125mm altında kalan kısmı filler toz malzeme olarak hesaplanmıştır. KH1 ve KH2 betonlarında filler toz malzeme kullanılmadan mevcut kullanılan kırma kireçtaşı kumun 0.125mm altı kalan kısmı ile toz madde ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. KH1 betonunda akışkanlaştırıcı katkı olarak bir tip polikarboksilat esaslı katkı kullanılmış, KH2 betonunda ise başka bir polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanım dozajı ve elde edilen çökme-yayıma değeri göz önünde bulularak çalışmaya KH1’de kullanılan katkı ile devam edilmesine karar verilmiştir. KH1 ve KH2 betonları kendiliğinden sıkışma özelliği göstermemiş, başarısız olmuşlardır. İlave toz malzeme kullanılmasının gerekli olduğu görülmüştür. Toz malzeme olarak iki ayrı incelikte (75 mikron ve filtre) olivin tozu ve kireçtaşı tozu temin edilmiştir. KH3 ve KH4 betonlarında 75 mikron altı olivin tozu, KH5 betonunda kireçtaşı tozu, KH6 ve KH7 betonlarında %50-%50 75 mikron altı ve filtre olivin tozu, KH8, KH9, KH10, KH11 betonlarında ise sadece filtre olivin tozu kullanılmıştır. KH8, KH9, KH10, KH11 betonlarında su/çimento oranı 0.65; 0.50; 0.60; 0.55 olan karışımlar dökülmüştür. KN için ise 0.55 su/çimento oranı kullanılmıştır.

**Tablo 1.2** Agregaların elek analizi sonuçları

Elek Boyutu (mm)		31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25
% Geçen	0/5 mm	-	-	100	100	75	50	35	23
	Ponza (6/20mm)	-	100	79	23	17	15	11	8

**Tablo 1.3** Agregaların fiziksel özellikleri

	Kireçtaşı 0/5 mm	Ponza 6/20 mm
Gevşek Birim Hacim Ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	1775	1013
Sıkışmış Birim Hacim Ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	2013	-
Tane Yoğunluğu	2,73	1,737
Su Emme Kapasitesi (%)	1,22	8,25

**Tablo 1.4** Beton karışım oranları

	KH1	KH2	KH3	KH4	KH5	KH6	KH7	KH8	KH9	KH10	KH11	KN
Çimento (kg)	408	359	384	391	391	394	399	399	393	390	395	397
Su (kg)	204	254	197	254	276	256	259	259	197	234	218	219
Olivin Tozu (75µ)	---	---	110	142	---	71.5	50.5	---	---	---	---	---
Olivin Tozu (filtre)	---	---	---	---	---	71.5	50.5	144	132	138	34	105
Kireçtaşı Tozu	---	---	---	---	123	---	---	---	---	---	---	---
Kırma Kireçtaşı 0-4 mm (kg)	508	447	404	359	359	362	456	366	404	372	415	956
Kırma Kireçtaşı 4-16 mm (kg)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	683
Ponza (Menderes) (kg)	813	715	782	706	685	712	688	719	794	731	815	---
Akış. Katkı (kg)	5.32	7.14	9.76	6.10	6.15	8.75	6.31	8.83	20.80	10.10	13.40	3.75
Hava Sür. Katkı (kg)	0.82	0.53	1.15	1.60	1.60	1.57	1.59	1.51	6.80	1.44	1.45	---
Hava (%)	4	8	7	6	5	5	4	4	4	6	4.6	1.6
Toplam (kg)	1940	1782	1888	1860	1842	1879	1911	1899	1949	1878	1891	2362
Toz (kg)	510	448	581	611	592	616	589	623	614	610	519	626
Hamur (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	417	487	466	519	530	515	497	510	455	502	445	443
Harç (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	641	684	654	687	696	684	695	681	644	676	639	753
Su/Çimento (ağ.)	0.50	0.71	0.51	0.65	0.71	0.65	0.65	0.65	0.50	0.60	0.55	0.55
Su/Toz (hacmen)	1.22	1.72	1.04	1.27	1.38	1.27	1.34	1.27	0.98	1.18	1.28	1.07
Akış. Katkı (%Ç ağ.)	1.30	1.99	2.54	1.56	1.57	2.22	1.58	2.21	5.28	2.58	3.40	0.94
Hava Sür. Katkı (%Ç ağ.)	0.20	0.15	0.30	0.41	0.41	0.40	0.40	0.38	1.72	0.37	0.37	---

**2.3 DeneY Sonuçları ve Deęerlendirme**

Hazırlanan karışımlara taze halde, çökme-yayıma, V-hunisi, 5 dk. gecikmeli V-hunisi, taze beton hava içeriği, taze beton birim hacim ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Sertleşmiş betonda ise hava kurusu birim hacim ağırlık, 7. ve 28. gün basınç dayanımı ölçümleri alınmıştır. DeneY sonuçları Tablo 1.5’de verilmiştir. Taze beton deneyleri sonucunda KH1, KH2, KH3, KH4, KH5, KH7, KH9, KH10 karışımlarının kendiliğinden sıkışan beton özelliğini sağlayamadıkları görülmüştür. KH6, KH8, KH11 ve KN karışımları kendiliğinden sıkışan beton kriterlerini sağlamaktadır. 2005 yılında yayımlanan Avrupa Birlięi proje raporu [6] kriterlerine göre yapılan sınıflandırmaya

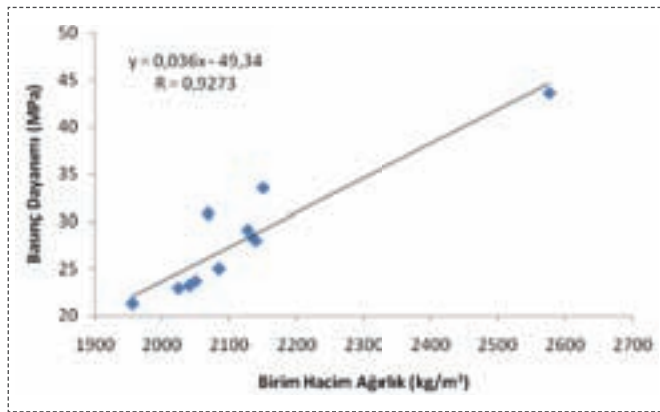
göre; çökme-yayıma sınıflamasında, KH6, KH8 ve KN betonları “SF1”, KH11 ise “SF2” sınıfına uygundur. Viskozite sınıflandırmasında ise KH6 ve KN betonları “VS1/VF1”, KH8 betonu “VS1/VF2” ve KH11 betonu ise “VS2/VF2” sınıfına girmektedir. Farklı nem içeriğindeki hafif agregaların kullanılması durumunda, nem düzeltmesi yapılsa dahi, taze beton özelliklerinin farklı olacağı düşünölmektedir. Literatürde bu düzensizliğin giderilmesi amacıyla agregaların doğgun hale getirilerek kullanılması benimsenmektedir. Ancak pratik anlamda böyle bir yöntemin uygulanması mümkün gözükmemektedir. Bu konuda, ayrı bir deneysel çalışma yazarlar tarafından yürütölmektedir.

**Tablo 1.5** Taze ve sertleşmiş beton deneY sonuçları

	KH1	KH2	KH3	KH4	KH5	KH6	KH7	KH8	KH9	KH10	KH11	KN
Çökme-yayıma	-	-	49x50	44x43	50x51	58x58	49x50	58x58	65x66	56x57	70x73	61x62
Çökme-yayıma sınıfı	-----	-----	-----	-----	-----	SF1	-----	SF1	-----	-----	SF2	SF1
T50 (sn)	-	-	4.3	-	1.0	1.9	3.3	2.0	7.9	10.1	5.5	1.5
V hunisi (sn)	-	-	15.7	6.0	3.8	6.3	6.7	10.6	---	61	51	6.3
V hunisi 5dk gec (sn)	-	-	31.4	11.5	4.2	8.0	10.1	11.5	---	85	52	6.35
$V_{5dk} - V$ (sn)			15.7	5.5	0.4	1.7	3.4	0.9	---	24	1	0.1
Viskozite sınıfı	-----	-----	-----	-----	-----	VS1/ VF1	-----	VS2/ VF2	-----	-----	VS2/ VF2	VS1/ VF1
Hava İçeriği(%)	4	8	7	6	5	5	4	4	4	6	4.6	1.6
Taze Beton BHA (kg/m <sup>3</sup> )	-	1956	2068	2040	2050	2085	2024	2139	2150	2136	2127	2577
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>												
7. gün	22.5	16.8	27.1	18.8	18.7	20.5	17.1	22.1	26.7	22.8	21.0	35.8
28. gün	26.6	21.3	30.8	23.2	23.7	25.0	22.9	28.0	33.5	28.2	29.1	43.6
<b>Hava Kurusu Birim Hacim Ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)</b>												
28. gün	1984	1833	1967	1890	1898	1933	1974	1988	2034	2136	1988	2394

Bilindiği gibi birim hacim ağırlıkta meydana gelen azalma basınç dayanımı değerlerini olumsuz etkilemektedir. Literatürden bu iki değer arasında bir bağıntı olduğu bilinmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, elde edilen tüm değerler için 28 günlük hava kurusu birim hacim ağırlık-basınç dayanımı değerleri arasında kurulan bağıntının güçlü olduğu ( $R = 0.9273$ ) göze çarpmaktadır. Yine kontrol örneğine göre basınç dayanımlarında olan azalmaların %23 ile %51 aralığında değiştiği, buna karşılık birim hacim ağırlıklardaki azalmaların ise %17 ile %24 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Birim hacim ağırlığı  $1988 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımı 28 MPa olan KH8 karışımı baz alındığında; kendiliğinden sıkışan normal betona (KN) göre, birim hacim ağırlığındaki %17 düşüğe karşılık, basınç dayanımında %36 düşüş olduğu görülmektedir.



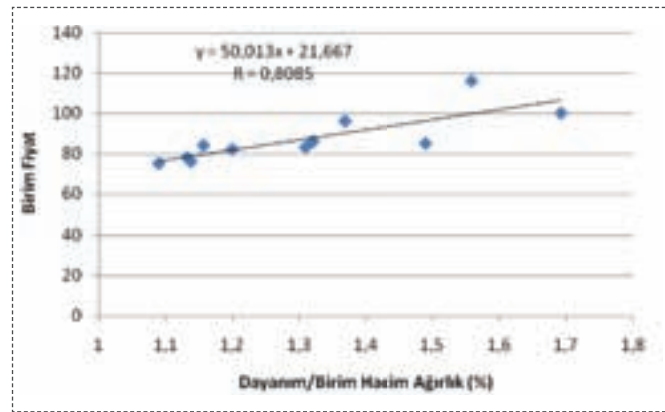
**Şekil 1.** Tüm karışımlar için 28 günlük birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi

#### 2.4 Maliyet Analizi

Çalışmada yapılan maliyet analizi hammadde ve işçilik (sabit) gibi direkt giderleri kapsamakta olup, hammadde taşıma, beton taşıma ve yerleştirme gibi giderleri kapsamamaktadır. Dolayısıyla sonuçlar irdelenirken beton tesisinin hammaddeye uzaklığı ve beton üretim maliyetinde değişiklik gösterebilecek diğer unsurlar dikkate alınmalıdır. Hesaplarda, atık malzeme olan olivin tozunun hammadde maliyeti sıfır kabul edilmiş, betonun toplam maliyetine etki eden en önemli kalemlerin çimento ve akışkanlaştırıcı katkı olduğu gözlemlenmiştir. Maliyet hesabında kontrol karışımı olan kendiliğinden sıkışan betonun metreküp maliyeti 100 birim olarak kabul edilmiş, diğer karışımların maliyetlerinin 75 birim ile 116 birim arasında değiştiği belirlenmiştir. Kendiliğinden sıkışma özelliği gösteren dört karışımın maliyet değerlendirmesi yapıldığında KH6, KH8 ve KH 11 karışımlarının birim fiyatları sırasıyla 82, 83 ve 96 olarak belirlenmiştir. Kendi-

liğinden sıkışan hafif betonların tümünün maliyeti kendiliğinden sıkışan normal betona kıyasla düşük olup istenilen dayanım sınıfını sağlaması durumunda maliyet anlamında KH 6 ve KH 8 karışımlarının tercih edilebileceği görülmektedir. Taze beton özellikleri ve dayanım anlamında ise KH 11 karışımı daha üstün özellikler sergilemektedir.

Çalışmada ayrıca, tüm karışımlar için dayanım/birim hacim ağırlık oranları yüzdece hesaplanarak birim fiyat değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2'den de görüldüğü üzere dayanım/birim hacim ağırlık yüzdeleri arttıkça birim fiyatların artışı göze çarpmaktadır. Bu analizdeki karışımların işlenebilirlik değerlerinin birbirlerinden farklı olduğu dikkate alınmalıdır.



**Şekil 2.** Tüm karışımların maliyet analizi

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve deney yöntemleri ışığında aşağıdaki sonuçlar derlenmiştir:

- Nem düzeltilmesi yapılmış, farklı nem içeriğindeki hafif agrega kullanılarak hazırlanmış aynı karışım oranlarındaki betonların farklı taze beton özelliği gösterdiği görülmüştür. Hafif agrega nem içeriğinin, kendiliğinden sıkışan hafif beton dizaynında belirleyici bir kriter olması gerektiği düşünülmektedir. Bu konuda ayrı bir çalışma devam etmektedir.
- Olivin tozunun, kendiliğinden sıkışan betonda toz filler malzeme olarak kullanılabilmesi görülmüştür.
- Beton birim hacim ağırlığı azaldığında beklendiği gibi ba-

sinç dayanımının azaldığı görülmüştür. Çalışmada elde edilen tüm karışımların birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Normal ağırlıktaki betona kıyasla kontrol örneğinde basınç dayanımında meydana gelen azalmalar, birim hacim ağırlıkta meydana gelen azalmalara kıyasla daha fazladır.

- Kendiliğinden sıkışan özellikte, birim hacim ağırlıkları 1898 ile 1988 kg/m<sup>3</sup> arasında, 28 günlük basınç dayanımı ise 23.7 ile 29.1 MPa arasında değişen karışımlar elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığı 1988 kg/m<sup>3</sup>, basınç dayanımı 28

MPa olan karışım baz alındığında; kendiliğinden sıkışan normal betona göre, birim hacim ağırlığındaki %17 düşüğe karşılık, basınç dayanımında %36 düşüş olduğu görülmektedir.

- Kendiliğinden sıkışma özelliği gösteren dört karışımın hammadde maliyetleri kıyaslandığında, hafif betonların maliyetinin normal betona kıyasla düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tüm karışımlar için dayanım/birim hacim ağırlık yüzdeleri arttıkça birim fiyatların arttığı göze çarpmaktadır. Ancak, hafif agrega kaynağından uzaklaşıldıkça bu durum değişecektir.

## Teşekkür

Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı, Tübitak, Yeni Prefabrike A.Ş. ve Pomza Export Madencilik A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

1. Crangle, R.D., **Pumice and Pumicite. US Geological Survey Minerals Year Book -Mineral Commodity Summaries**, 2010.
2. Türk Standartları Enstitüsü, **TS 2511, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları**, TSE-Ankara, Türkiye, 1977.
3. Türk Standartları Enstitüsü, **TS EN 206-1, Beton - Bölüm1: Özellik Performans İmalat ve Uygunluk**, TSE-Ankara, Türkiye, 2002.
4. The European Union - **Brite EuRam III LWAC Material Properties State-of-the-Art EuroLightCon Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete Document BE96-3942/R2**, Project BE96-3942, 1998.
5. RILEM TC, "Final report of RILEM TC 205-DSC: Durability of self-compacting concrete RILEM Technical Committee" **Materials and Structures**, V. 41, pp. 225-233, 2008.
6. Self Compacting Concrete European Project Group, **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use**, Warrington, 2005.
7. Kadiroğlu, İ., "Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, pp. 301-311, 2004.
8. Choi Y.W., Kim. Y.J., Shin, H.C. ve Moon, H.Y., "An Experimental Research on the Fluidity and Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Self-Compacting Concrete", **Cement and Concrete Research**, V.36, 9, pp. 1595-1602, 2006.
9. Andiç-Çakır, Ö., Yoğurtcu, E., Yazıcı, Ş., Ramyar, K., "Self Compacting Lightweight Aggregate Concrete: Design and Experimental Study", **Magazine of Concrete Research**, V.61, 7, pp. 519-527, 2009.