

Çevrenin korunmasında kömür baca külünün hafif yapı malzemesi yapımında kullanımı

¹Salih Yüksek*, ¹Semih Kaya, ¹Bülent Erdem, ¹Tuğba Doğan, ²Zekeriya Duran
¹Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 58140 Sivas
²Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksek Okulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 58140 Sivas

Özet:

Termik santrallerde çoğunlukla linyit kömürünün yakılması sonucu ortaya çıkan toplam katı atığın ortalama %80'i baca külü ve %20'si taban külü olup doğal arazilerde depolanmaktadır. Santrallerde 1 kWh'lik enerji üretmek için yaklaşık 110 gram kül atık olarak ortaya çıkmakta ve 1000 MW'lık bir santralden yılda 650 bin ton kül üretilmektedir. Bugün dünyada yılda 600 milyon ton kül çevreye salınmaktadır. Ülkemizde faal olarak 11 adet termik santral bulunmakta ve yılda 13 milyon ton kül üretilmektedir. Dünyada ve ülkemizde enerji ihtiyacı her geçen gün artmakta olduğundan çevreye salınan kül miktarı da gittikçe artmaktadır. Termik santral artıklarının değerlendirilmesi üzerine çalışmalar 1937'lerde başlamış olup daha çok çimento ve beton imalatında katkı maddesi olarak kullanımı yaygındır. Dünyada üretilen külün ancak %15'i bu şekilde değerlendirilebilmektedir. Kurulu gücü 457 MW olan Sivas-Kangal termik santralinden yılda yaklaşık 400 bin ton kül üretilmekte olup bu atıklar hâlihazırda herhangi bir biçimde değerlendirilmemektedir. Sivas havzasında milyarlarca tonluk jips kaynakları bulunmaktadır. Bu çalışmada Kangal Termik santrali uçucu külü ile alçı ve kirecin değişik oranlarda karışımları ile hafif yapı malzemesi üretimi deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde standartlarda istenilen deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Linyit, termik santral, baca külü, hafif yapı malzemesi

Utilizing fly ash for lightweight construction material production in the protection of environment

Abstract:

Approximately 80 per cent and 20 per cent of the total solid waste resulting from the burning of lignite coal in thermal power plants are fly ash and bottom ash, respectively. This material is stored in natural terrain. In order to generate 1 kWh of power approximately 110 grams of ash is produced and a thermal power plant of 1000 MW capacity produces some 650 000 tons of ash on a yearly basis. Today, 600 million tons of ash per year are released into the environment. There operate 11 thermal power plants in Turkey and some 13 million tons of ash are produced annually. As the need for energy in the world and in our country is rapidly increasing, so does the amount of ash released into the environment. Studies on the evaluation of the thermal power plant ashes have started in 1937s. The wastes are more widely used as additives in cement and concrete production. However only 15 per cent of the total ash produced can be evaluated as such. Some 400 thousand tons of ash per year is being produced in Sivas-Kangal thermal power plant of 457 MW installed capacity. This material is not considered in any way. Sivas basin contains billions of tons of gypsum resources. In this study, production of lightweight building material was investigated experimentally by mixing different ratios of gypsum and lime with the Kangal thermal power plant fly ash. Required tests were carried out in accordance with relevant standards. The results were interpreted.

Keywords: Lignite, Thermal power plant, Fly ash, Lightweight construction material

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering Cumhuriyet University, 58140, Sivas TURKEY. E-mail address: 58sy01@gmail.com, Phone: +903462191010ext1330

1. Giriş

Termik santrallerin kapasitelerindeki hızlı artış gereği her yıl milyonlarca ton uçucu kül atık malzemesi olarak üretilmektedir. Uçucu kül üretiminin artması gerek çevresel problemler gerekse ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Bugün Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon ton kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir [1]. Avrupa topluluğu ülkelerinde oluşan külün veya uçucu külün %15’i, Amerika Birleşik Devletlerinde ise %20-30’u değişik sektörlerde hammadde olarak kullanılırken ülkemizde bu oran %1’i geçmemektedir. Termik santral küllerinin kullanımının başında çimento ve betonda katkı maddesi, yol yapımında dolgu maddesi, zemin stabilizasyonu ve beton blok olarak kullanılması gelir. Son yıllarda birçok araştırmacı tarafından termik santral atığı küllerden tuğla olabilirliği üzerine araştırmalar yapılmaktadır [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Çalışmaların çoğunda geleneksel kille baca külünün belli oranlarda karıştırılması ve pişirilmesi ile tuğla yapımı araştırılmıştır. Bu çalışmada ise, sade alçı, kireç, termik santral uçucu külü ve suyun farklı oranlarda karıştırılmasıyla doğal ortamda kurutulularak mukavemet kazandırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada tuğla örneklerinin hazırlanmasında kullanılan uçucu kül Kangal Termik santralinden, alçı Sivas Akkaya bölgesindeki bir fabrikadan ve kireç malzemesi ise Tecer kireçtaşlarından üretim yapan bir fabrikadan temin edilmiştir. Tuğla numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler olan sade alçı, uçucu kül ve kirecin kimyasal analiz (XRF) sonuçları Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmiştir. Uçucu kül ve sade alçının kimyasal analizleri Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde yapılmış, kirecin kimyasal analizi ise Kireç Firmasının yaptırdığı analiz değerleridir. Kangal uçucu külü, TS EN 197-1’e göre, reaktif kireci % 10’un üzerinde olduğu için kalkersi uçucu kül (W) sınıfına girmektedir. ASTM C 618’e göre $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı yani $S+A+F > \%50$ olduğu için bu kül C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül kapsamına girmektedir. Kangal uçucu külü, yüksek kireçli uçucu kül ($CaO > \%10$) olduğu için serbest kireç miktarı ortalama % 7.65 olup, TS EN 450’ de verilen %1.0 sınırının üzerindedir[9].

Tablo 1. Sade alçının kimyasal bileşimi (XRF sonuçları)

% Bileşen				
H ₂ O	CaO	SO ₃	SiO ₂	NaCl
4.50	37.45	53.50	0.25	0.01

Tablo 2. Uçucu külün kimyasal bileşimi (XRF sonuçları)

% Bileşen				
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂
12.07	4.51	24.38	2.69	40.70

Tablo 3. Kirecin kimyasal bileşimi

CaO	MgO	% Bileşen		
		Kızdırma kaybı	Son sıcaklık	T 60 Değeri
90.19	1.12	3.98	71.6	28.50

Değişik katkıları kullanarak uçucu kül katkılı tuğla yapmak amacıyla 160 mm × 40 mm × 40 mm boyutlarında kalıp hazırlanmıştır. Sade alçı, termik santral uçucu külü ve kirecin, boyut analizleri, kimyasal analizleri, özgül ağırlıkları ve termik santral uçucu külünün nem kaybı belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların (Sade alçı + Uçucu kül + Kireç + Su) ise kalıplara dökülmeden önce harç kıvamlarının bütün örneklerde aynı olması için çap analizleri yapılmıştır. Ayrıca örnek numunelerin ilk donma ve son donma süreleri belirlenmiştir. Daha sonra her birinden beşer adet olmak üzere 17 farklı şekilde sade alçı, uçucu kül, kireç ve su karışımları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu numunelerin karışım kodları-yüzdesel oranları, donma süreleri ve yoğunlukları Tablo 4’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 4. Tuğla numunelerinin hazırlanmasında elde edilen veriler

Kod	Karışım oranları	Su/karışım oranları (%)	İlk donma (ti) (dd:nn)	Son donma (td) (dd:nn)	Yoğunluk (d) (g/cm ³)
D-1	%100A*	69	11:50	28:00	1.59
D-2	%80A+%20UK**	74	07:40	19:00	1.52
D-3	%60A+%40UK	80	06:20	16:00	1.45
D-4	%40A+%60UK	84	05:50	14:00	1.41
D-5	%20A+%80UK	86	14:50	-	-
D-6	%40A+%45UK+%15K***	75	09:00	22:00	1.40
D-7	%40A+%30UK+%30K	80	10:10	24:00	1.36
D-8	%40A+%15UK+%45K	95	12:00	25:20	1.34
D-9	%50A+%40UK+%10K	65	07:30	18:50	1.47
D-10	%50A+%25UK+%25K	75	08:40	21:00	1.46
D-11	%50A+%10UK+%40K	85	10:00	23:30	1.45
D-12	%60A+%30UK+%10K	80	06:00	15:45	1.46
D-13	%60A+%20UK+%20K	82	08:00	20:00	1.45
D-14	%60A+%10UK+%30K	84	12:00	25:10	1.44
D-15	%70A+%20UK+%10K	72	05:20	14:00	1.49
D-16	%70A+%15UK+%15K	74	06:30	15:00	1.48
D-17	%70A+%10UK+%20K	76	06:50	15:20	1.47

A*: Sade Alçı UK**: Uçucu Kül K***: Kireç

Kalıplardan çıkarılan tuğla numunelerinin kurutulması için laboratuvarında 15, 30, 45 ve 60 gün süre ile bekletilmiştir (Şekil 1). Laboratuvarında bekletilen tuğla numuneleri üzerine kalıptan çıkarıldıkları günden itibaren 15’er gün aralıklarla, basınç dayanımı, su emme, eğilme mukavemeti, yüzey sertliği ve özgül ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Deneylere 60. gün sonuna kadar devam edilmiştir. Numunelerin bekletilme süreleri deneylerde iyileştirme yöntemi olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Kalıptan Çıkarılmış Tuğla Numuneleri

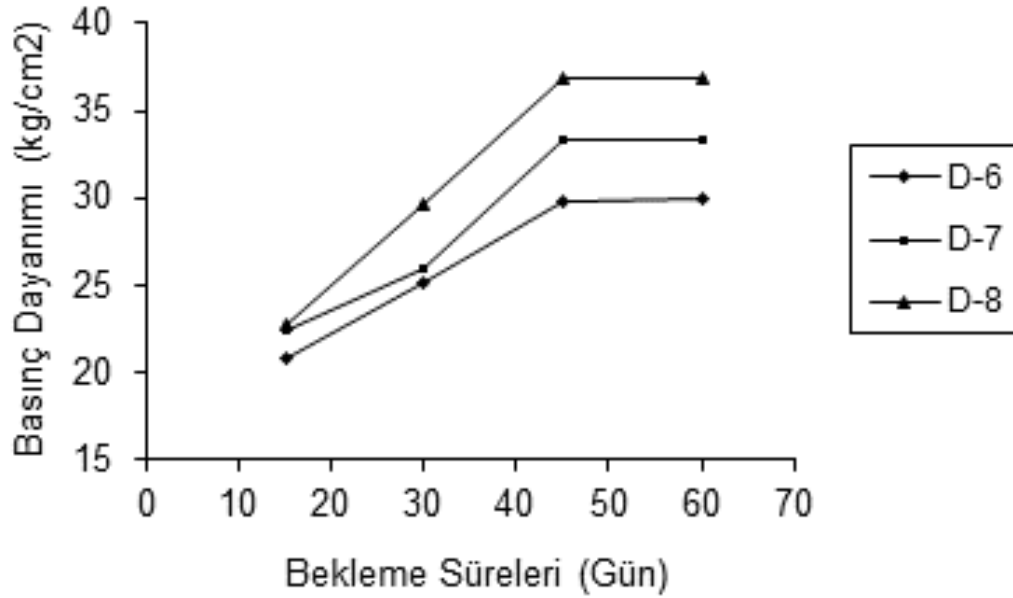
3. Bulgular ve Tartışma

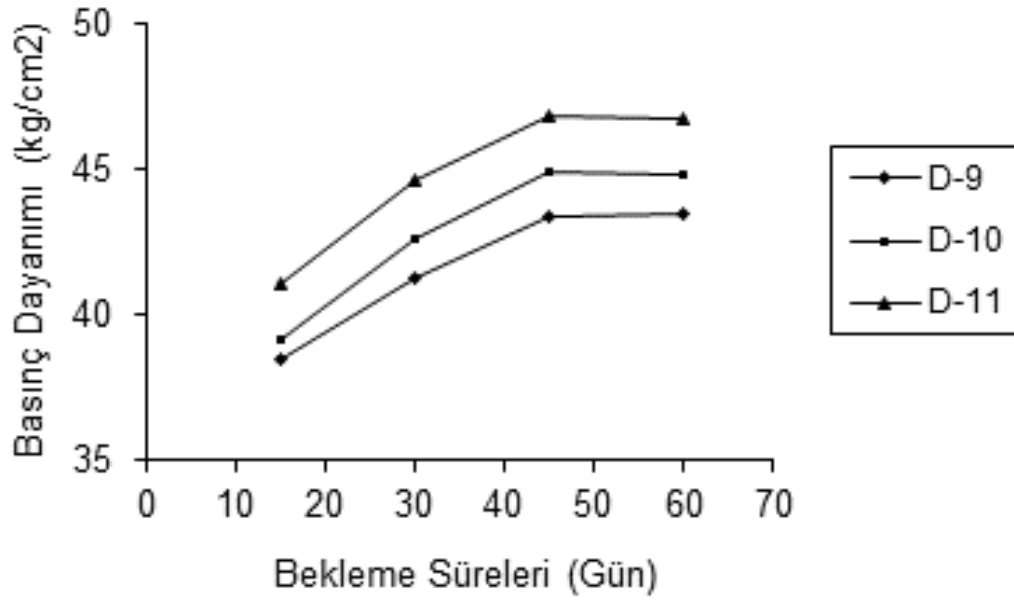
Deneyler sonucunda her bir tuğla numunesi için hesaplanan ortalama basınç dayanımı ve porozite değerleri Tablo 5’de özetlenmiştir. Tablo 5’de görüldüğü gibi tuğla numunelerin kalıplarından çıkarılmasından sonra 15. gün sonunda yapılan deneylerde en yüksek basınç dayanımına ve en düşük poroziteye sahip tuğla numunesi **D-1** olarak isimlendirilen %100 Sade alçıdan üretilmiş tuğladır. Ancak bu tuğlanın basınç dayanımının zamanla herhangi bir değişiklik göstermediği gözlenmiştir. Bunun yanında D-16 (%70 sade alçı + %15 uçucu kül + %15 kireç) ve D-17 (%70 sade alçı + %10uçucu kül + %20 kireç) tuğlalarının bekleme süreleri sonunda D-1 tuğlasının basınç dayanımı değerine yaklaştığı ve D-17 tuğlasının basınç dayanımı değerinin D-1 tuğlasının basınç dayanımı değerini geçtiği görülmektedir. Tuğla numunelerinin D-1 hariç diğerlerinde bekleme süreleriyle birlikte basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Bu mukavemet artışları 45.gün sonunda yapılan deneylere kadar devam etmiş daha sonra ise tuğla numunelerinin 45. gün sonundaki mevcut mukavemetlerinin korunduğu ve çok küçük değerler dışında bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Sade alçı ve kirecin bağlayıcı özelliğinin yüksek olmasıyla birlikte, bu karışımlar içerisindeki uçucu külün, tuğlaların dayanımını zamanla arttırması özelliği göstermesiyle uçucu kül katkısının önemi görülmüştür. Bekletilme süreleriyle birlikte tuğla numunelerinin üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinde uçucu kül ve kireç katkısının önemi görülmektedir.

Diğer yandan D-5 (%20 sade alçı + %80 uçucu kül) tuğlasının kalıplarda uzun süre bekletildiği halde tuğla numunesi oluşturacak dayanıma ulaşamadıkları gözlenmiştir. Tuğlaların basınç dayanımı deneyi sonuçlarının daha iyi görülmesi ve karşılaştırılabilmesi bakımından aynı sade alçı oranlarıyla yapılmış tuğla numunelerinin basınç dayanımı ile bekleme süreleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5).

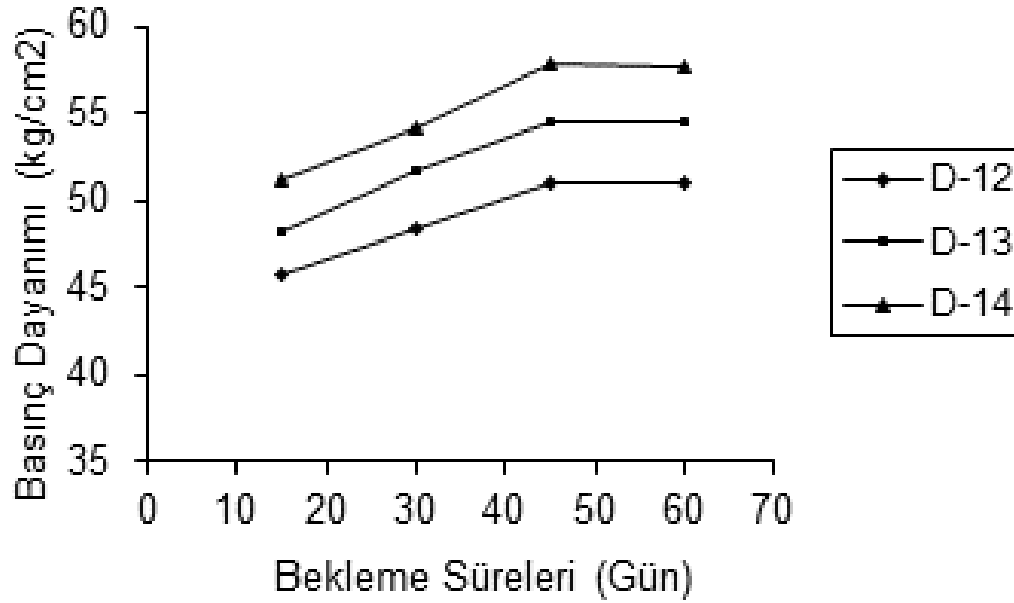
Tablo 5. Bekletilen tuğla numunelerinin basınç dayanımı ve porozite sonuçları

Kod	Basınç Dayanımı (kg/cm ²)				Porozite (%)			
	Numunelerin bekletilme süreleri (gün)				Numunelerin bekletilme süreleri (gün)			
	15 Gün	30 Gün	45 Gün	60 Gün	15 Gün	30 Gün	45 Gün	60 Gün
D-1	91.6	91.6	91.6	91.6	27.0	27.2	27.1	27.0
D-2	75.6	84.6	87.8	87.9	41.7	42.2	42.4	42.3
D-3	31.5	3.6	38.9	38.7	53.6	53.7	52.3	52.4
D-4	13.4	18.6	23.4	23.4	64.5	65.2	63.4	63.6
D-5	-	-	-	-	-	-	-	-
D-6	20.8	25.2	29.8	29.9	55.6	55.0	53.4	53.6
D-7	22.4	26.0	33.4	33.3	59.6	58.8	56.2	56.0
D-8	22.7	29.6	36.9	36.9	70.1	65.7	66.5	66.5
D-9	38.5	41.3	43.4	43.5	43.9	46.5	43.0	44.0
D-10	39.2	42.6	44.9	44.8	50.6	50.9	48.3	49.2
D-11	41.1	44.6	46.9	46.8	57.5	59.1	53.7	55.5
D-12	45.7	48.3	51.0	50.9	52.8	52.0	52.0	52.0
D-13	48.1	51.6	54.5	54.4	54.0	52.7	52.6	52.3
D-14	51.1	54.1	57.8	57.6	56.0	56.4	56.2	56.0
D-15	83.0	86.7	89.5	89.5	44.2	44.2	45.2	43.2
D-16	83.7	87.7	91.4	91.0	44.9	45.1	45.5	43.6
D-17	84.0	88.5	92.7	92.8	45.9	45.3	45.8	45.8

**Şekil 2.** %40 sade alçı oranına sahip D-6, D-7 ve D-8 tuğlalarının basınç dayanımları

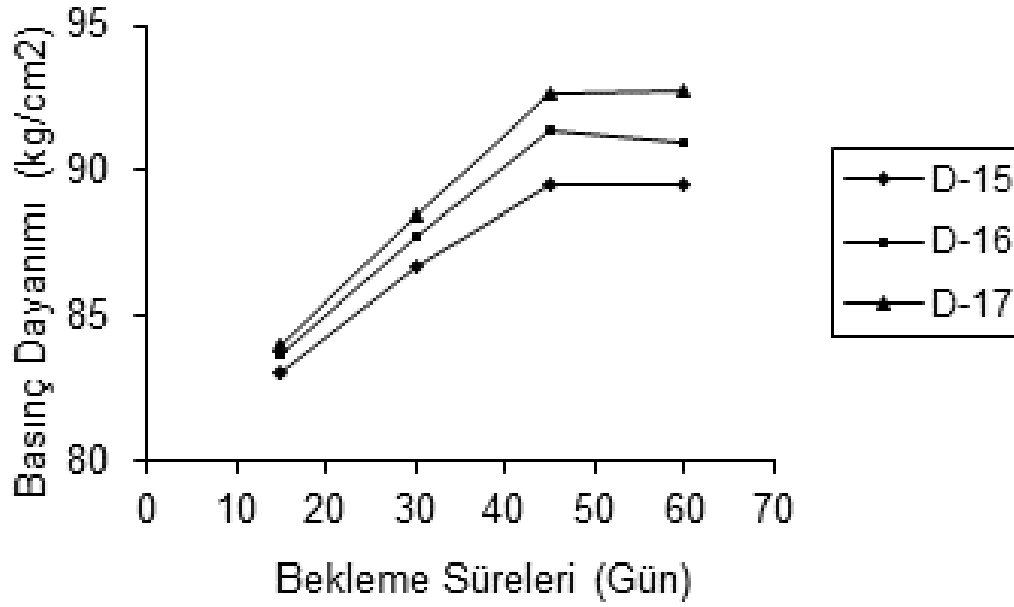


Şekil 3. %50 sade alçı oranına sahip D-9, D-10 ve D-11 tuğlalarının basınç dayanımları

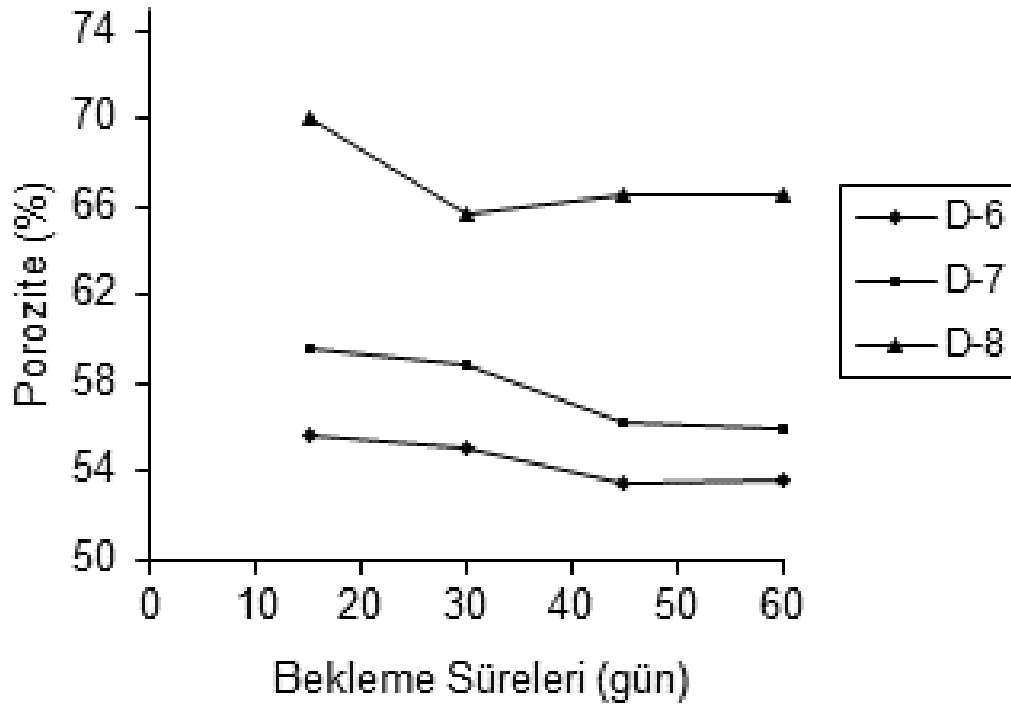


Şekil 4. %60 sade alçı oranına sahip D-12, D-13 ve D-14 tuğlalarının basınç dayanımları

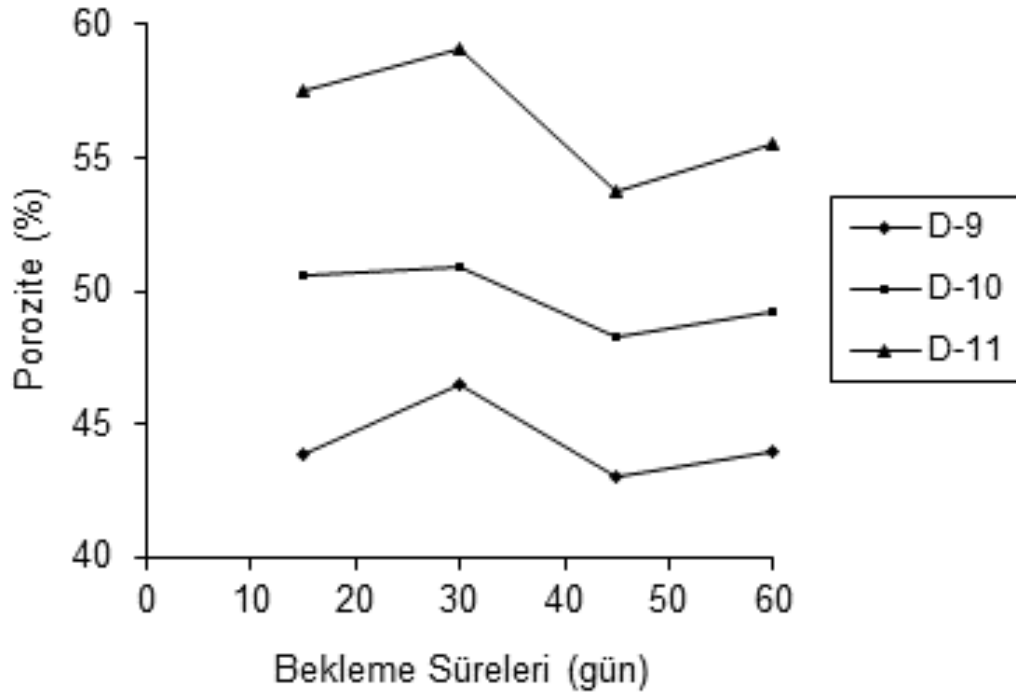
Benzer biçimde tuğla numunelerinin porozite deneyi sonuçlarının daha iyi görülmesi ve karşılaştırılabilmesi bakımından aynı sade alçı oranlarıyla yapılmış tuğla numunelerinin poroziteleri ile bekleme süreleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9).



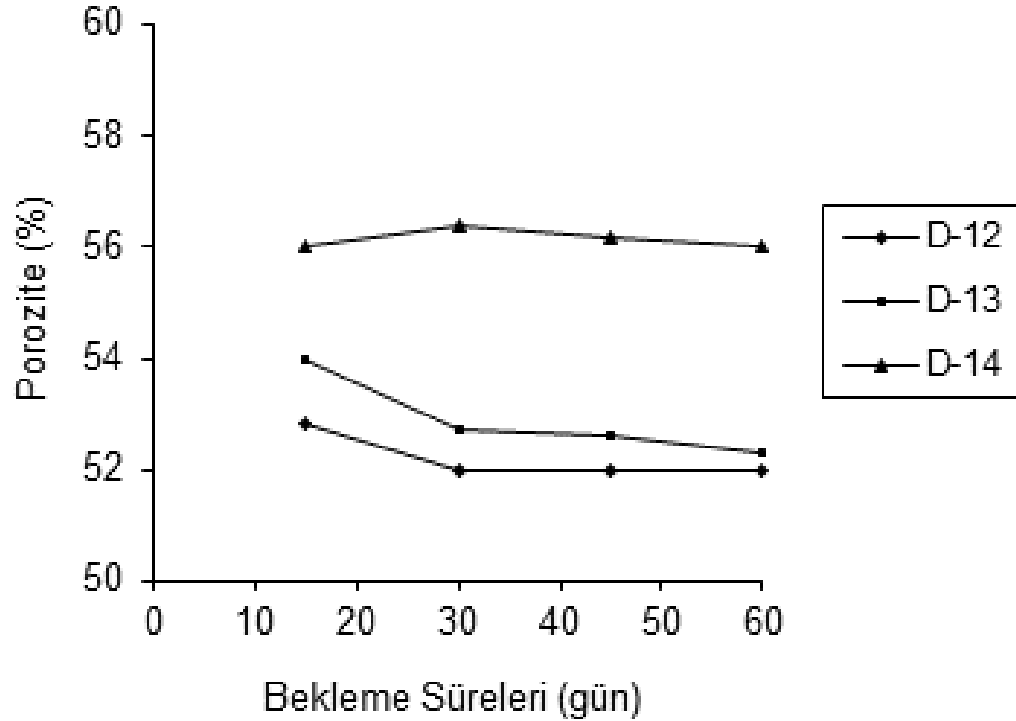
Şekil 5. %70 sade alçı oranına sahip D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının basınç dayanımları



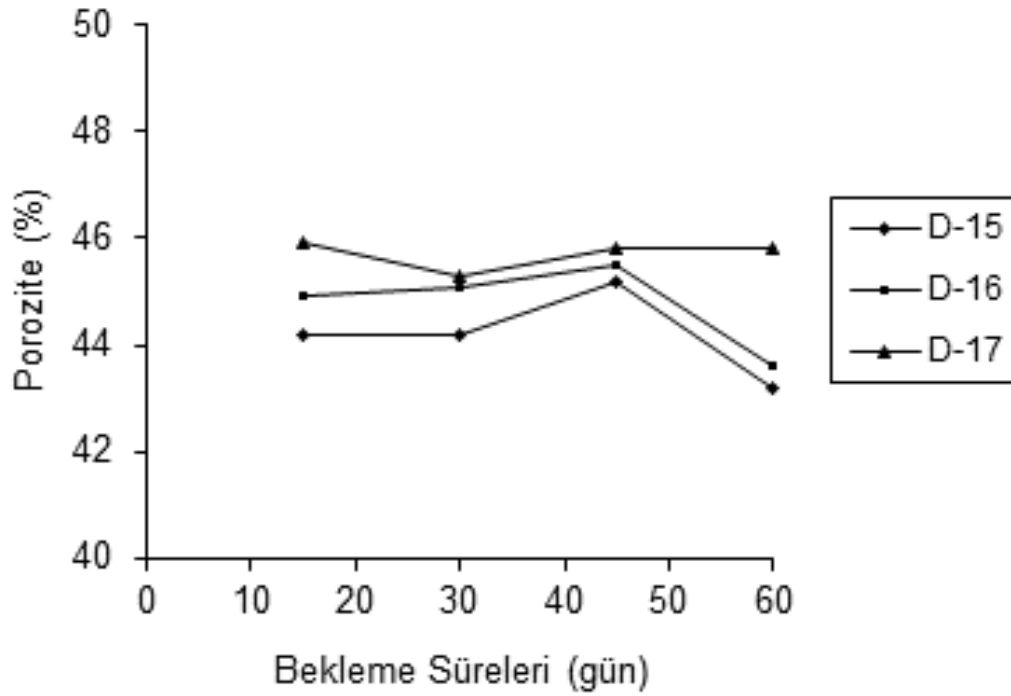
Şekil 6. %40 sade alçı oranına sahip D-6, D-7 ve D-8 tuğlalarının porozitesi



Şekil 7. %50 sade alçı oranına sahip D-9, D-10 ve D-11 tuğlalarının porozitesi



Şekil 8. %60 sade alçı oranına sahip D-12, D-13 ve D-14 tuğlalarının porozitesi



Şekil 9. %70 sade alçı oranına sahip D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının porozitesi

Grafiklerden de görüldüğü gibi bekleme süreleri tuğlaların basınç dayanımlarını önemli ölçüde arttırmış, porozite değerlerinde ise 15 gün sonunda yapılan deneylerle 45. gün sonunda yapılan deneylerin sonuçları karşılaştırıldığında bariz bir azalış veya artış gözlenmemiştir. Aynı sade alçı oranlarına sahip tuğla numuneleri incelendiğinde, kirecin numunelerinin porozitelerini uçucu küle oranla daha fazla arttırdığı görülmüştür.

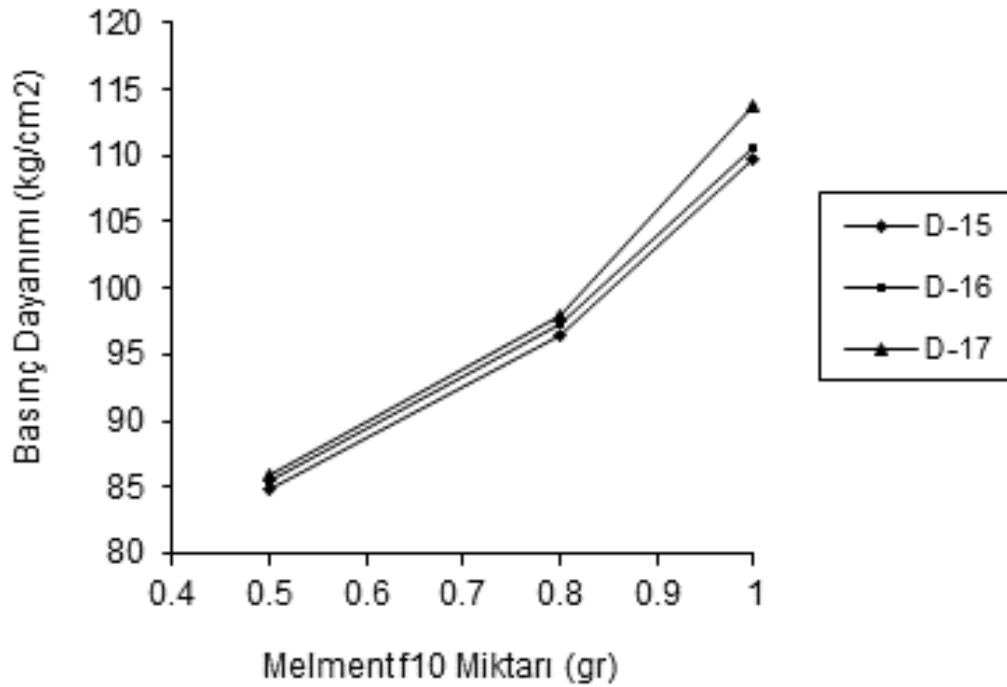
D-17 tuğlalarının basınç dayanımı değeri olarak 45. günün sonundaki değerleri D-1 tuğlalarının basınç dayanım değerlerinden yüksek olmasının yanı sıra porozitelerinin D-1 tuğlalarına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarına basınç mukavemetini artırıcı ve poroziteyi düşürücü Melment f10 isimli kimyasal madde katılması ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Melment f 10 kimyasalı sırasıyla D-15, D-16 ve D-17 tuğlaları için hazırlanan karışımlara ilave edilmiştir. Melment f10 kimyasalının ilave miktarları ise her örnek için 0.5/1000 g, 0.8/1000 g ve 1/1000 g gibi çok küçük miktarlardır. Melment f10 kimyasalının ilavesinin yüksek dayanımlı tuğlalara uygulanmasında, elde edilen en yüksek dayanımı daha iyi hale getirebilmek ve poroziteyi düşürebilmek amaçlanmıştır. Kimyasalın ilave oranlarındaki değişim ise ek ilave kimyasal miktarıyla deney sonuçlarında olabilecek değişimini görebilmek içindir. Melment f10 kimyasalı ilave edilmiş tuğlaların 15. gün sonunda basınç dayanımı ve porozite deneyi sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

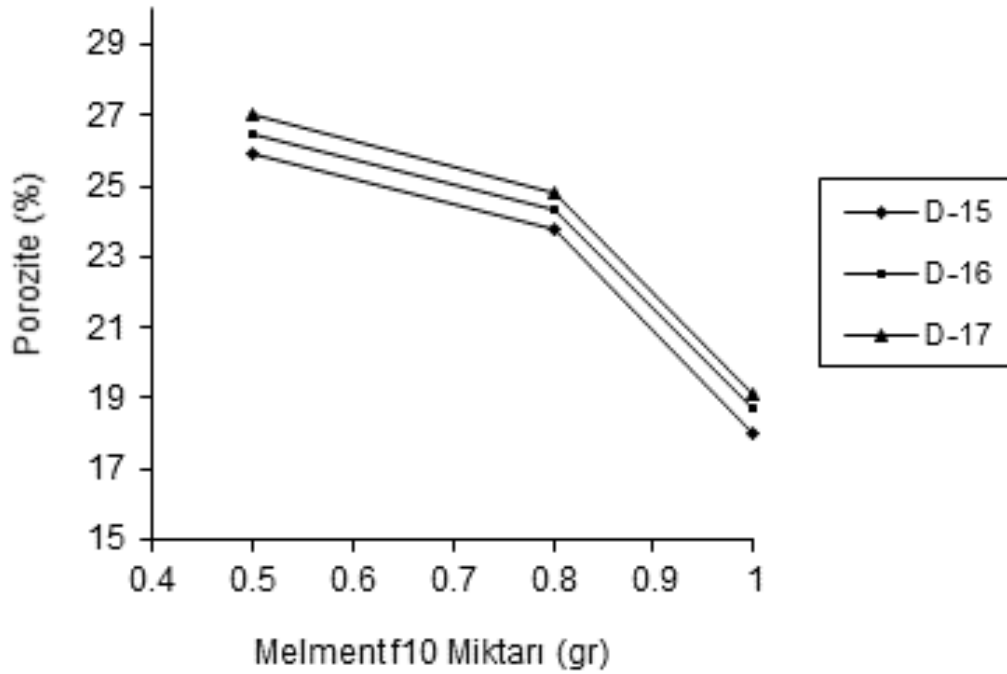
Tablo 6'da görüldüğü üzere Melment f10 ilavesi ile tuğlaların basınç dayanımlarını arttırmasının yanı sıra porozitelerinde aynı oranlarda düştüğü gözlenmiştir. Aynı karışım oranlarında olan tuğlalara değişen miktarlarda Melment f10 kimyasalı ilavesinin tuğlalarda üzerindeki olumlu sonuçları da Tablo 6'de açıkça görülmektedir.

Tablo 6. D-15, D-16 ve D-17 tuğlarına farklı oranlarda Melment f10 ilavesiyle elde edilen basınç dayanımı ve porozite

Kod	Basınç dayanımı (kg/cm ²)	Porozite (%)
D-15 + 0.5/1000 g Melment f10	84.8	25.9
D-15 + 0.8/1000 g Melment f10	96.5	23.8
D-15 + 1/1000 g Melment f10	109.7	18.0
D-16 + 0.5/1000 g Melment f10	85.5	26.5
D-16 + 0.8/1000 g Melment f10	97.3	24.3
D-16 + 1/1000 g Melment f10	110.5	18.7
D-17 + 0.5/1000 g Melment f10	86.0	27.0
D-17 + 0.8/1000 g Melment f10	97.9	24.8
D-17 + 1/1000 g Melment f10	113.8	19.1

D-15, D-16 ve D-17 tuğlarına değişik oranlarda Melment f10 katılarak elde edilen tuğla numunelerinin basınç dayanımlarında ve porozitelerindeki reaktif miktarının artışıyla gözlenen değişim sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11’de görülmektedir.

**Şekil 10.** Melment f10 ilavesiyle tuğlaların basınç dayanımlarındaki değişim



Şekil 11. Melment f10 ilavesiyle tuğlaların porozitelerindeki değişim

Tuğlaların basınç dayanımlarını yükselmesi ve porozite değerlerini düşürmesi avantajlarının yanında Melment f10 kimyasal oldukça pahalı olup %1 oranındaki Melment f10 ilavesi tuğla maliyetlerini günümüz koşullarında %25 civarında arttıracığı hesaplanmaktadır.

Basınç dayanımı ve su emme deneyleri sonuçları diğer örnek tuğlalara göre olumlu sonuçlar veren D-15, D-16 ve D-17 tuğla numunelerinin Melment f10 ilavesinden sonra basınç dayanımlarında yükselme porozitelerinde ise azalma gözlenmiştir. Bu sonuçlarla alçı bazlı tuğlaların porozitelerinin kil tuğlaların porozitelerine göre yüksek olduğu gözlenmiştir. Halen inşaat yapımında kullanılan kil bazlı tuğlaların poroziteleri maksimum %7 iken Basınç dayanımı en yüksek değerde elde edilen D-17 tuğlalarının porozitesi %19.1'dir. Bu amaçla D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının porozitelerini düşürmek amacıyla, inşaat sektöründe “Harçta Su Geçirimsizlik Katkısı” olarak kullanılan ve çimento harcının yapımında suya maksimum 1/9 oranında katılan, SICA (Pero Hidrol) isimli kimyasal madde katılarak hazırlanmıştır. Tuğlaların bu şekilde hazırlanmasından sonra kalıplardan çıkarılan tuğla numunelerinin kuruması beklenilmiş ve tuğlaların yüzeyleri SICA malzemesi ile kaplanmıştır. Bu şekilde hazırlanan tuğlaların 15 gün sonundaki basınç dayanımları ve porozite deneyi sonuçları Tablo 7’de görüldüğü gibidir.

Tablo 7. SICA ile hazırlanan ve kaplanan D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının porozite ve basınç dayanımı

Kod	Basınç Dayanımı (kg/cm ²)	Porozite (%)
D-15	83.0	5.9
D-16	83.7	6.3
D-17	84.0	6.9

Bu sonuçlarla SICA malzemesinin tuğlaların basınç dayanımında herhangi bir değişikliğe yol açmadığı ve dayanımın SICA katılmadan hazırlanan tuğla numuneleriyle aynı olduğu görülmüştür.

D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının hazırlanmasında hem su ile %25 oranında karıştırılarak hem de tuğla yüzeylerine sır olarak kaplanarak kullanılan Sica malzemesi tuğlaların porozitelerini kil tuğlalarda istenilen porozite oranına (maksimum %7) düşürdüğü gözlenmiştir.

15, 30, 45 ve 60'ar gün aralıklarla basınç dayanım ve poroziteleri değerleri Tablo 5'de verilen tuğla numunelerinin yoğunluk, eğilme mukavemeti ve yüzey sertliği deney sonuçları Tablo 8'de özetlenmiştir.

Tablo 8. Bekletilen tuğla numunelerinin yoğunluk-eğilme mukavemeti ve yüzey sertliği deneyleri sonuçları

Tuğla no	Yoğunluk (g/cm ³)				Eğilme mukavemeti (kg/cm ²)				Yüzey sertliği SHORE D			
	Bekletilme süreleri				Bekletilme süreleri				Bekletilme süreleri			
	15 Gün	30 Gün	45 Gün	60 Gün	15 Gün	30 Gün	45 Gün	60 Gün	15 Gün	30 Gün	45 Gün	60 Gün
D-1	1,14	1,13	1,13	1,13	79,90	79,90	79,90	79,89	65	65	65	65
D-2	1,02	1,01	1,01	1,01	54,70	54,90	57,40	57,40	58	60	60	60
D-3	0,90	0,89	0,89	0,89	25,80	26,70	29,10	29,10	41	46	46	46
D-4	0,84	0,83	0,83	0,83	8,30	8,80	9,30	9,30	23	28	29	29
D-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D-6	0,83	0,82	0,82	0,82	16,00	17,70	19,30	19,30	41	45	46	46
D-7	0,82	0,81	0,81	0,81	16,60	16,80	17,40	17,40	42	46	46	47
D-8	0,81	0,79	0,79	0,79	18,30	19,20	20,90	20,90	43	47	47	48
D-9	0,86	0,85	0,85	0,85	26,90	28,40	30,60	30,60	46	49	49	49
D-10	0,85	0,84	0,84	0,84	27,40	28,90	31,10	31,10	47	50	51	51
D-11	0,84	0,83	0,83	0,83	27,90	29,10	31,90	32,00	48	51	52	52
D-12	0,88	0,87	0,87	0,87	32,00	33,10	34,70	34,60	50	53	54	54
D-13	0,87	0,86	0,86	0,86	33,50	34,80	35,60	35,60	52	55	56	56
D-14	0,86	0,85	0,85	0,85	35,10	36,70	37,80	37,70	53	56	57	57
D-15	1,01	0,99	0,99	0,99	43,40	44,00	46,40	46,30	58	61	62	62
D-16	1,00	0,98	0,98	0,98	45,00	46,80	48,80	48,80	59	62	63	63
D-17	0,97	0,96	0,96	0,96	47,00	48,10	51,60	51,50	62	66	67	67

Tablo 8'de görüldüğü gibi farklı oranlarda sade alçı içeren örnekler birbirleriyle karşılaştırıldığında Sade alçı oranının artmasıyla birlikte yoğunlukların arttığı gözlenmektedir. Bu durum Tablo 5'de görülen basınç dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırıldığında basınç dayanımı ile yoğunluk arasında doğru orantı görülmektedir. Diğer yandan porozite ile yoğunluk arasında ters orantı olduğu gözlenmiştir. Yoğunluk arttıkça tuğlaların porozitelerinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte karışım oranları dikkate alınmaksızın yüksek oranlarda poroziteye sahip numunelerin düşük dayanımlara sahip oldukları gözlenmiştir. Eğilme mukavemeti değerlerinin basınç dayanımıyla doğru orantıda arttıkları görülmektedir. Eğilme mukavemeti değerlerinin de basınç mukavemeti değerlerinde olduğu gibi bekleme süreleri ile 45. güne kadar arttığı daha sonra ise sabit kaldığı görülmektedir. Tuğlaların yüzey sertliklerinin de alçı oranlarıyla dolayısıyla basınç dayanımlarıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmektedir. Yüksek basınç dayanımı gösteren tuğlaların yüzey sertliklerinin de aynı oranda arttığı görülmektedir.

Tablo 8'de %70 sade alçı oranlarıyla imal edilen tuğlalar incelendiğinde Yüzey sertliği ve eğilme mukavemeti en yüksek tuğlaların D-17 tuğlaları olduğu görülmektedir. Yoğunluğu yüksek olan tuğla ise D-15'tir. Tablo 5 ve Tablo 8 birlikte incelendiğinde genel olarak tuğlaların artan alçı

oranlarıyla basınç dayanımlarının, yoğunluklarının, eğilme mukavemetlerin ve yüzey sertliklerinin arttığı, porozitelerin ise düştüğü gözlenmektedir. Uçucu külün aynı alçı oranlarındaki tuğlalarda, arttıkça dayanımı düşürüp su emmeyi arttırdığı ama kireçle kıyaslandığında ise uçucu külün daha az porozite artışına sebep olduğu görülmektedir.

Karışım oranları dikkate alınmaksızın Tablo 8’de görüldüğü gibi D-1 tuğlalarının yoğunlukları diğer tuğlalara göre daha yüksektir. Bu tuğlaların yoğunluğunun yüksek olması şüphesiz ki sade alçının özgül ağırlığının uçucu kül ve kirece oranla daha yüksek olmasıyla ilişkilidir. Diğer yandan D-1 tuğlalarının basınç dayanımları ve yüzey sertlikleri D-17 tuğlalarına göre bekleme süreleri dikkate alındığında daha düşüktür. Yoğunluğu düşük, basınç dayanımı ve yüzey sertliği yüksek olan **D-17** tuğlaları diğer örneklerle göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Sonuçlar

Laboratuvarda üretilen tuğlalar sade alçı, uçucu kül ve kireç üzerine su ilavesi ile tepkimeye giren çimento harcı kıvamında kalıplara boşaltılarak elde edilen bir malzemedir. Betona benzer şekilde, üretilen tuğlaların basınç dayanımları ve eğilme mukavemetleri bekleme süreleriyle artmakta ve 45. gün sonunda yapılan deneylere kadar bu artış devam etmektedir. Daha sonra bu artışların durduğu ve sabitlendiği görülmektedir.

En yüksek basınç dayanımına sahip D-17 tuğlalarının su emmeleri diğer karışım oranları ile üretilen tuğlaların su emmelerine oranla daha düşük olmasının yanında D-1 olarak isimlendirilen %100 sade alçıyla üretilen tuğlalara oranla su emmeleri yüksektir. Bu dezavantaj D-17 tuğlalarının karışımına 1/1000 g Melment f10 ilavesi ile giderilmiş ve D-17 tuğlalarının su emmeleri %45.8’den %19.1’e indirilmiştir. Ayrıca Melment f10 ilavesi bu tuğlaların basınç dayanımları da 92.8 kg/cm²’den 113.8 kg/cm²’ye yükselmiştir.

Alçı, kireç ve uçucu küle göre daha belirgin bağlayıcı özelliğe sahiptir. Buda tuğlaların artan alçı oranlarıyla basınç dayanımlarının, eğilme mukavemetlerinin, yüzey sertliklerinin, yoğunluklarının artmasına ve su emmelerinin azalmasına neden olmaktadır. Artan uçucu kül oranları tuğlalarının basınç dayanımlarının azalmasına ve su emmelerinin artmasına neden olmaktadır. Sade alçı, uçucu kül ve kireç malzemeleriyle üretilen tuğlaların uçucu kül ve kireç içeriği arttıkça su emmeleri artmış, yoğunlukları arttıkça ise su emmeleri azalmıştır.

Üretilen tuğlalarda en yüksek basınç dayanıma ve en düşük su emmeye sahip D-17 tuğlalarının yoğunlukları 0.96 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Kil bazlı tuğlaların ise Türk standartlarında belirtilen yoğunlukları 1.4-2.2 g/cm³ arasındadır.

Üretilen tuğlalarla kil tuğlalar kıyaslandığında alçı bazlı tuğlalar bina yapımında kullanıldığında binalardaki ölü ağırlığı azaltacak ve işçilik maliyetleri başta olmak üzere inşaat maliyetlerini de düşürecektir.

İnşaat sektöründe kullanılan kil bazlı tuğlalardan fabrika tuğlalarının basınç dayanımları ortalama 25-75 kg/cm² iken D-17 tuğlalarının basınç dayanımı 92.8 kg/cm² olarak elde edilmiştir. Melment f10 ilavesiyle D-17 tuğlalarının basınç dayanımları 113.8 kg/cm²’ye kadar yükselmiştir.

Bu sonuçlara göre D-17 tuğlalarının gerek yoğunluğunun düşük olması gerekse basınç dayanımlarının yüksek olması bina yapımında kullanılan kil bazlı tuğlalarla rahatlıkla yer değiştirecek konumda oldukları görülmüştür.

Alçı bazlı tuğlaların dezavantajları ise, D-17 tuğlalarının su emmelerinin minimum %19.1 oranlarına kadar düşürülmesidir. Piyasada kullanılan kil bazlı tuğlaların su emmeleri maksimum %7'dir. Bu durumda görüldüğü gibi alçı bazlı tuğlaların su emmeleri kil bazlı tuğlalara göre daha yüksektir. Alçı bazlı tuğlaların su emmelerini kil tuğlaların su emmelerine yakın hale getirebilmek için inşaat sektöründe kullanılan Sica ticari isimli harçta su geçirimsizlik katkısı kullanılmıştır. Sica malzemesi D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının hem harç hamurlarının hazırlanmasında suyun %25'i olarak hem de kalıptan çıkarıldıktan sonra yüzeylerine sır olarak kaplanması şeklinde uygulanmıştır. Bu şekilde hazırlanan D-15, D-16 ve D-17 tuğlalarının su emmeleri sırayla %5.9, %6.3 ve %6.9 olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlardan sonra hazırlanan uçucu kül katkılı alçı tuğlaların halen inşaat sektöründe kullanılan kil tuğlalara alternatif olarak üretilebileceği ve uçucu külün optimum %10-15 oranında kullanılabileceği ortaya konmuştur. Alçı, uçucu kül ve kireç rezervleri bakımından çok zengin olan Sivas bölgesinde endüstriyel bazda hafif tuğla üretimi için ArGe çalışmalarına hız verilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Türker P. Erdoğan B. Katnaş F. Yeğınobalı A. 2009 Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB / AR-GE / Y03.03, Ankara, 112 s.
- [2] Kızgut S. Çuhadarođlu D. Çolak K. Çatalağzı termik santrali uçucu küllerinden tuğla üretim olanaklarının araştırılması, Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-TUMAKS 2001, © 2001, ISBN 975-395-416-6.
- [3] Bentli İ. Uyanık A.O. Demir U. Şahbaz O. Çelik M.S. Seyitömer termik santrali uçucu küllerinin tuğla katkı hammaddesi olarak kullanımı, Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-TUMAKS 2001, © 2001, ISBN 975-395-416-6.
- [4] Kumar S. 2002 A perspective study fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development, Department of Civil Engineering, Harcourt Butter Technological Institute, Kanpur 208002, India.
- [5] Atış C.D. Gorur E.B. Karahan O. Bilim C. İlkentapar S. Luga E. 2015 Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration, Construction And Building Materials, vol.96, pp.673-678.
- [6] Naganathan S. Mohamed A.Y.O. Mustapha K.N. 2015 Performance of bricks made using fly ash and bottom ash, Construction and Building Materials, Volume 96, Pages 576-580.
- [7] Consoli N.C. Rocha C.G. Saldanha R.B. 2014 Coal fly ash-carbide lime bricks: An environment friendly building product, Construction and Building Materials 69 Pages 301-309.
- [8] Cultrone G. Sebastián E. 2009 Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks, Construction and Building Materials 23 Pages 1178-1184.
- [9] Şengül Ü. 2002 Kangal termik santralinde uçucu kül atımının çevresel etkileri, ÇEVKOR, Cilt11 Sayı 44, 21-24s.