
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 27-03-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 07-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.300934	

Jeopolimer Harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi

Mehmet Kaya^{*1}, Mücteba Uysal², Kemalettin Yılmaz³

ÖZ

Çimento, insanoğlunun son iki yüz yıldır yaygın olarak kullandığı en önemli yapı malzemelerinden birisidir. Çimentonun üretimi sırasındaki yüksek enerji ihtiyacı ve açığa çıkan CO₂ gazının atmosfere vermiş olduğu zararlı etki, son yıllarda en çok üzerinde düşünülen konulardan birisidir. Bu sebeple çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretimi için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerin çeşitli kimyasal aktivatörler ile karıştırılarak aktive edilmesi sonucu çimento benzeri bağlayıcı yapı malzemesi üretmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada uçucu külün, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) ile aktive edilmesi sonucu elde edilen jeopolimer harçların çeşitli yaş gruplarındaki dayanımları ile kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi araştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Numunelerin boşluk oranları, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada sosyal bilimler istatistik programı (SPSS) kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: jeopolimer, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, varyans analizi

Investigation of the relationship between strength, curing temperature and void ratio in Geopolymer Mortar with variance analysis

ABSTRACT

Cement is one of the most important building materials that human beings have used extensively in the past two and a half years. The high energy requirement in the production of cement and the detrimental effect of CO₂ gas released to the atmosphere is one of the most controversial issues in recent years. For this reason, a number of studies have been carried out for the production of alternative binding material for cement. It is possible to produce cement-like binder-like building material by mixing materials such as metakaolin, blast furnace slag and fly ash with various chemical activators. In this study, variance analysis of cure temperature and void ratio relation of various age groups of geopolymer mortars obtained after the activation with fly ash, sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃) was investigated. No significant change was observed between the compressive and flexural strengths of different ages of samples produced by curing at different temperatures. The void ratios of the samples did not show a significant change with respect to the age of the sample. It was found that there is a significant relationship

¹ Bozok Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, mehmet.kaya@bozok.edu.tr

² İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mucteba.uysal@istanbul.edu.tr

³ Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kmyilmaz@sakarya.edu.tr

between the compressive strengths and the material variables forming the geopolymer. Social sciences statistics program (SPSS) was used in the study.

Keywords: geopolymer, compressive strength, flexural strength, analysis of variance

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimento sektörü enerjiye dayalı bir sektör olup, çimento maliyetinin %59,1' ini enerji oluşturmaktadır [1]. Bunun yanı sıra 1 ton çimento üretimi sırasında atmosfere yaklaşık 900 kg CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Dünyada 30 gigametrik ton CO₂ salınımının %5'i, çimento sektöründen kaynaklanmaktadır [2]. 2014 yılı itibariyle dünya genelinde çimento üretiminin 4,3 milyar tona ulaştığı belirtilmektedir [3]. Çimentonun çevreye olumsuz etkilerine karşılık sürdürülebilir bir çevre koruma çalışması için, çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretimine yönelik yapılan çeşitli çalışmalar son yirmi yıldır hız kazanmıştır. Metakaolin, kırmızı çamur vb, doğal malzemelerin yanı sıra yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ gibi çeşitli kimyasallarla aktive edilmesi sonucu bağlayıcı yapı malzemesi üretmek mümkün olabilmektedir [4]. Özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel ürünlerin geri dönüşümün sağlanması açısından alkaliler kullanılarak harç üretilmesi çalışmaları 1960'lı yıllardan beri devam etmektedir [5]. Metakaolin, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi doğal ve endüstriyel atık malzemelerin alkalilerle aktivasyonu sonucu jeopolimer [6] adı verilen bağlayıcı elde edilmektedir. Jeopolimer harçlarda, yüksek basınç dayanımı, yüksek sıcaklık dirençleri ve yüksek aşınma dayanımı gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra, düşük sülfat dayanımları, yüksek kılcallık gibi olumsuzluklarda gözlenmektedir. Donma-çözülme dirençleri boşluk yapısının azalması ile artmaktadır [7]. Çimento ve su karışımı sertleştiğinde yapısında su bulunan C-S-H jelleri oluştuğu için refrakter malzeme yapımında bağlayıcı olarak kullanılamamaktadır. Jeopolimerlerin oluşumu sonucu yapısında gözlenen N-A-S-H jellerinde ise su bulunmamaktadır. Jeopolimer üretiminde, karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, jeopolimerin kuruması sırasında jeopolimer içerisinde süreksiz ve küçük boşluklar bırakarak jeopolimeri terk etmektedir. Bu durum jeopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın direnci gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır [8].

Jeopolimer üretiminde kullanılan uçucu küllerin karakteristikleri ne olursa olsun aktivasyon sonucu tamamında amorf yapı oluşmaktadır. Genellikle en yüksek dayanımın sodyum silikat içeren aktivatör ile elde edilmektedir. Bunun yanında SiO₂/Na₂O kütle oranı ve Si/Al atomik oranı arttıkça basınç dayanımının arttığını, yüksek basınç dayanımının direkt olarak Si/Al atomik oranıyla ilgilidir [9]. Jeopolimerin taze ve sertleşmiş durumdaki davranışı üzerinde, uçucu külün tipi, tane dağılımı, mineralojik kompozisyonu ve artan sodyum silikat karışım oranı etkilidir [10]. Literatürde su/jeopolimer oranı ve aktivatör/uçucu kül oranının basınç dayanımı ve işlenebilirlik üzerine direkt etkisi olduğu belirtilmekle birlikte, sıvı alkali/su oranı jeopolimerin dayanımına en etkili faktördür [11].

Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül, kum, NaOH+Na₂SiO₃ karışımı ile 90 °C' de 48 saat süre ile aktive edilerek 3 gün ile 180 gün arasındaki eğilme ve basınç dayanımlarının, kür sıcaklığı, boşluk oranı arasındaki ilişki sosyal bilimler istatistik programı ile incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Numunelerin boşluk oranları, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1.Materyal (Material)

Deneysel çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. NaOH'un kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of NaOH)

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit (Kostik)
Kimyasal Formülü	NaOH
Molekül ağırlığı	40 gr/mol
Asidimetrik	≥97
Na ₂ CO ₃	≤1
Cl	<0,01
SO ₄	≤0,01
Ağır Metal	≤0,002
Al	≤0,002
Fe	≤0,002

Cam suyu olarak bilinen sodyum silikat ticari olarak kapalı plastik ve cam kaplarda sıvı olarak satılmaktadır. Çalışmada kullanılan sodyum silikatın kimyasal kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Na₂SiO₃'ün kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Na₂SiO₃)

Kimyasal Adı	Sodyum Silikat (Cam suyu)
Kimyasal Formülü	Na ₂ SiO ₃ nH ₂ O
Molekül ağırlığı	122,06 g/mol
Yoğunluk	1,39 g/cm ³ (20 C'de)
Ağırlıkça Modül	2,00
SiO ₂ /Na ₂ O	
Na ₂ O	%11,71
SiO ₂	%23,46
Demir(Fe)	39 ppm
Klor (Cl)	%0,01
Sülfat (SO ₄)	%0,01

Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül, Kütahya Tavşanlı'da Bulunan Tunçbilek Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of Tunçbilek F class flyash)

Kimyasal kompozisyon	(%)
MgO	3,68
Al ₂ SO ₃	21,41
SiO ₂	58,73
SO ₃	0,25
Na ₂ O	0,28
Ka ₂ O	1,65
CaO	1,88
Fe ₂ SO ₃	10,46
Çözünmez kalıntı	24,33
Kızdırma kaybı	0,64
TOPLAM	98,98
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık (ton/m ³)	2,24
45 mikron elek bakiyesi (%)	4,9
Blain özgül yüzey (cm ² /gr)	3703

Çalışmada harç karışımlarının tamamında içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmış olup kimyasal özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. İçme suyu şebekesinden alınan suyun kimyasal özellikleri (Chemical properties of water from drinking water network)

Al (µg/l)	Fe (µg/l)	Amonyum (mg/l)	İletkenlik (µg/cm)	Nitrit (mg/l)	pH
0	10	0,13	730	0	7,96

Deneylede, TS EN 196-1'e [12] uygun, maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Tablo 5'te standart kumun granülometrisi ve sınır değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Standart kumun granülometrisi ve sınır değerleri (Standard sand granulometry and boundary values)

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2
Kalan (%)	99	85	64	36	9	0
Sınır Değer (%)	99±1	87±5	67±5	33±	7±5	0

2.2.Yöntem (Method)

Bu çalışmada, Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'nden sağlanan, separe edilmiş F tipi uçucu kül; ağırlıkça %14 Na içeren, silikat modülü Ms=0,2 olan, Na₂SiO₃ ve NaOH karışımı aktivatör ile aktive edilerek jeopolimer harç numuneler üretilmiştir. Numunelere, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C ve 100 °C de 48 saat süreyle sıcaklık kürü uygulanmıştır. Sıcaklık küründen çıkarılan numuneler, 3-7-14-28-90-180 günü tamamlayacak şekilde ±22 °C oda sıcaklığında, havada kür edilmiştir. Daha sonra eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarının, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ile ilişkisi varyans analizi yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca, F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkilerinin anlamlı olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Numunelerin standart harç mikserinde hazırlanması ve etüve yerleştirme biçimleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Basınç ve eğilme testleri ile ilgili çalışmalar Şekil 2'de verilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE VARYANS ANALİZİ (TEST RESULTS AND VARIANCE ANALYSIS)

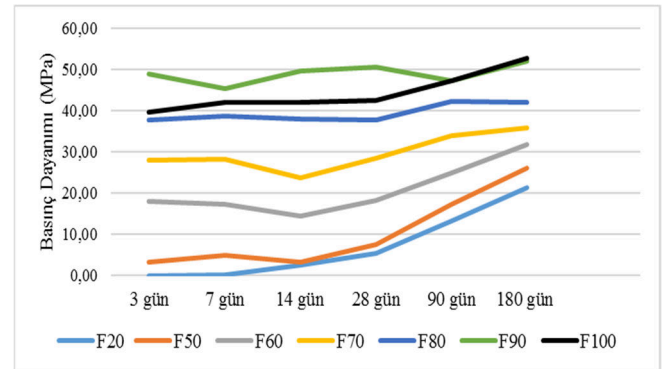
Numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları şekil 3'teki grafikte verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilen numunelerin basınç dayanımları, 3.günde 0,00-48,96 MPa arasında değişim gösterirken, 360 gün sonra 28,75-52,01 MPa arasında değişim göstermektedir. 20 °C'de kür edilen numunelerin 3 günlük basınç dayanımları ile 90 °C'de kür edilen numunelerin 3 günlük basınç dayanımları arasında 48,96 MPa bir fark gözlenirken, 180 günlük basınç dayanımları arasındaki fark 30,77 MPa olarak tespit edilmiştir. Kür sıcaklığının artışı ile birlikte basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Sıcaklık artışı, jeopolimer harçlarda aktivatörün kimyasal reaksiyonunu artırarak dayanım artışına neden olmaktadır [7]. Düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımları yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda daha fazla artış göstermiştir. Bu durum, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin içerisinde aktive olmamış aktivatörün varlığından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerde, aktivatör reaksiyonu tükendiği için ilerleyen yaşlarda dayanım artışı az olmaktadır.



Şekil 1. Numunelerin üretilip etüve konulması (Making samples and putting the flour)

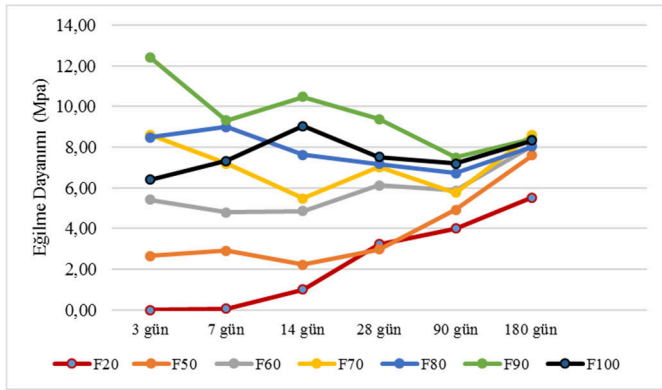


Şekil 2. Basınç ve Eğilme deneylerinin yapılması (Performing Compressive and Flexural tests)



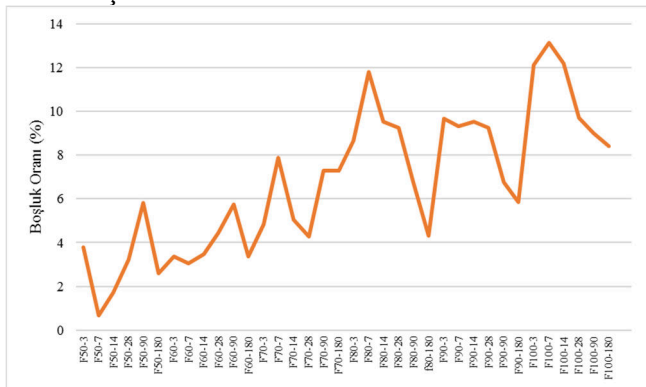
Şekil 3. F Sınıfı Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Çimentosuz Numunelerin Basınç Dayanımları (Compressive Strength of Cementless Samples Produced Using F Class Fly Ash)

Numunelerin eğilme dayanımlarına ait deney sonuçları şekil 4'teki grafikte verilmiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin eğilme dayanımları yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda artış eğilimindedir.



Şekil 4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (Bending strengths of cement-free specimens produced using F class fly ash)

Numunelerin boşluk oranlarına ait deney sonuçları şekil 5’teki grafikte gösterilmiştir. Kür sıcaklığının artması ile numunelerin boşluk oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum numunelerin her sıcaklık grupları için geçerlidir. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numuneler içerisindeki su buharlaşım numuneyi terk ettiği için boşluk oluşmaktadır. Düşük sıcaklıkta kür uygulanmış numuneler, yüksek sıcaklıkta kür uygulanmış numunelere göre daha fazla su içerdiğinden boşluk oranları daha düşüktür.



Şekil 5. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin boşluk oranları (Void ratios of cementless samples produced using F class fly ash)

varyans analizi iki ya da daha fazla gruba ait ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. Eğer ikiden fazla grubun ortalamaları karşılaştırılacak ise F Testi diğer bir isimle varyans analizi uygulanır. İki den fazla grubun ortalamaları arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığını test eden F testinin hipotezi aşağıdaki gibidir [13].

$H_1: X_1 = X_2 = X_3 = \dots = X_N$ Yani ortalamalar arasında fark yoktur.

H_2 : Ortalamalardan en az ikisi arasında anlamlı fark vardır.

Bu çalışmadaki hipotezler SPSS(Sosyal Bilimler İstatistik Programı) kullanılarak test edilmiştir.

3.1. Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi (Analysis of compressive strengths of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

H_2 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Numune kodlamalarında sıcaklık esas alınmıştır. 50 °C-60 °C-70 °C-80 °C-90 °C-100 °C’de kür edilmiş numuneler için, sırasıyla F50- F60- F70- F80- F90- F100 kodları verilmiştir.

Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar	Ortalama için 95% güven aralığı							
	Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum
F50	6	29,3367	16,77559	6,84861	11,7318	46,9416	3,21	48,96
F60	6	28,0367	16,33750	6,66976	10,8915	45,1818	4,89	45,34
F70	6	29,8933	17,02368	6,94989	12,0281	47,7586	3,30	49,61
F80	6	33,6200	15,44709	6,30625	17,4093	49,8307	7,63	50,64
F90	6	36,8850	11,41320	4,65942	24,9076	48,8624	17,25	47,21
F100	6	40,8617	12,08273	4,93276	28,1816	53,5417	25,96	52,69
Total	36	33,1056	14,65271	2,44212	28,1478	38,0633	3,21	52,69

Varyans analizi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları varyans analizi (Variation analysis of compressive strengths of samples of different ages with curing temperature)

BASINÇ	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	749,536	5	149,907	0,665	0,653
Grup içi	6765,031	30	225,501		
Toplam	7514,567	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,653>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H_1 hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur. Bu sonuç jeopolimer harçlar için beklenen bir durumdur. Jeopolimer harçlardaki karmaşık kimyasal reaksiyon, geleneksel harçlarda olduğu gibi ilerleyen yaşlarda basınç dayanımında anlamlı bir artışa neden olmamaktadır [6].

3.2 Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi (Analysis of bending strengths of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak, F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

H_2 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Tablo 8 numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları verilmiştir. Numune kodlamalarında sıcaklık esas alınmıştır. Sırasıyla 50 °C-60 °C-70 °C-80 °C-90 °C-100 °C’de kür edilmiş numune için sırasıyla F50- F60- F70- F80- F90- F100 kodları verilmiştir.

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,39>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H_1 hipotezi kabul edilir; farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı

yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur. Jeopolimer harçlarda, basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da zamana bağlı dayanım artış veya azalışı, aktivatörün oranı, kür sıcaklığı, bağlayıcı özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır [7].

Tablo 8. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar		Ortalama için 95% güven aralığı						
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	9,4050	5,23602	2,13760	3,9101	14,8999	2,65	17,88
F60	6	6,7533	2,47504	1,01043	4,1559	9,3507	2,91	9,30
F70	6	6,6183	3,01692	1,23165	3,4523	9,7844	2,23	10,48
F80	6	6,7000	2,11468	0,86332	4,4808	8,9192	2,98	9,38
F90	6	6,3300	0,98065	0,40035	5,3009	7,3591	4,92	7,50
F100	6	8,1667	0,35246	0,14389	7,7968	8,5365	7,59	8,60
Total	36	7,3289	2,85084	0,47514	6,3643	8,2935	2,23	17,88

Tablo 9’ da varyans analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 9. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi (Variation analysis of bending strengths of samples of different ages with curing temperature)

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	43,449	5	8,690	1,082	0,390
Grup içi	241,007	30	8,034		
Toplam	284,456	35			

3.3. Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı analizi (Analysis of void fraction of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerde, boşluk oranının, numune yaşına göre değişim gösterip göstermediğinin araştırılması:

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirirli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

H₂: Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim gösterir. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 11'de varyans analizi sonuçları verilmiştir. %95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,898>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H₁ hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

Tablo 10. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar								
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalama için 95% güven aralığı				
				Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	7,0700	3,58685	1,46432	3,3058	10,8342	3,36	12,11
F60	6	7,6450	4,90300	2,00164	2,4996	12,7904	0,68	13,15
F70	6	6,9133	4,09396	1,67135	2,6170	11,2097	1,73	12,20
F80	6	6,6917	3,00765	1,22787	3,5353	9,8480	3,22	9,70
F90	6	6,8983	1,18643	0,48436	5,6533	8,1434	5,76	9,00
F100	6	5,2983	2,28340	0,93220	2,9020	7,6946	2,58	8,42
Total	36	6,7528	3,22951	0,53825	5,6601	7,8455	0,68	13,15

Tablo 11. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı varyans analizi (Variance analysis of void ratio of samples of different ages with curing temperature)

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	18,377	5	3,675	0,318	0,898
Grup içi	346,665	30	11,555		
Toplam	365,041	35			

Boşluk oranı, kür sıcaklığı arttıkça artmakla birlikte, numunenin yaşı ilerledikçe de boşluk oranı artmaktadır. Varyans analizi kür sıcaklığına bağlı gruplandırma yaptığı için anlamlı değişim görülmemesi beklenen bir sonuç olarak düşünülmektedir.

3.4. Jeopolimer numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkileri (the effect of variables on compressive strength in geopolymer samples)

F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde su oranı, NaOH miktarı ve Na₂SiO₃ miktarlarının ortalama, standart sapma değerleri Tablo 12'de, model özeti ise Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 12. Değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri (Mean and standard deviation values of variables)

Malzeme	Ortalama	Standart Sapma
Su	Örnek	71,321
	Örnek	30
	Std. Sapma	57,0828
	Toplam	2139,63
NaOH	Ortalama	80,5937
	Örnek	30
	Std. Sapma	47,4318
	Toplam	2417,81
Na ₂ SiO ₃	Ortalama	136,524
	Örnek	30
	Std. Sapma	97,5348
	Toplam	4095,72
Basınç Dayanımı	Ortalama	19,6463
	Örnek	30
	Std. Sapma	9,8111
	Toplam	589,39

Tablo 13. Model özeti (Model summary)

Model	İstatistiksel değişim								
	R	R kare	Düzeltilmiş R Square	Tahminin standart hatası	R kare değişimi	F değişimi	df1	df2	Sig. F değişimi
1	0,495(a)	0,246	0,230	8,49283	0,246	15,836	3	146	0,000

a Belirleyiciler: (İçerik), Na₂SiO₃, NaOH, Su

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre, malzemelerin basınç dayanımı üzerine etkisi için anlamlılık değeri $p=0,000<0,05$ bulunmuştur. Bu durumda malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Malzemeler ile basınç dayanımı arasındaki varyans analizi sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Malzemeler ile basınç dayanımının varyans analizi (Variance analysis of pressure resistance with materials)

Model		Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.
1	Regression	3426,593	3	1142,198	15,836	0,000(a)
	Residual	10530,710	146	72,128		
	Total	13957,303	149			

a Belirleyiciler: (İçerik), Na₂SiO₃, NaOH, Su,

b Bağımlı değişken: basınç

Malzemelerin, basınç dayanımı ile ilişkisini gösteren katsayılar Tablo 15 verilmiştir. Model özetindeki R değeri, su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün basınç dayanımı üzerinde 0,495 oranında etki ettiğini göstermektedir. Numunelerin tamamında aynı aktivatör oranı kullanıldığından dolayı, bağımsız değişkenler olan su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün, basınç dayanımı üzerine etkisini standart katsayılı formül haline getirmek mümkün olmamaktadır.

Tablo 15. Malzemelerin İlişki katsayıları (Relation coefficients of materials)

Model	İçerik	Standart dışı katsayılar		Standart Katsayılar		
		B	Std. hata	Beta	t	Sig.
1	(İçerik)	0,623	20,236		0,031	0,976
	Su	0,192	0,131	1,116	1,461	0,156
	NaOH	-0,038	0,041	-0,184	-0,926	0,363
	Na ₂ SiO ₃	0,062	0,077	0,612	0,797	0,433

a. Bağımlı değişken: Basınç dayanımı

4. SONUÇ (RESULT)

Üretilen numunelerin, boşluk oranları, eğilme ve basınç dayanımları incelenmiş, daha sonra dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranları ile ilgili hipotezler ortaya atılmıştır. Hipotezlerin doğruluğu SPSS programı yardımıyla varyans analizi yapılarak kontrol edilmiştir. Sonuç olarak;

1. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmalarda, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin, yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda daha fazla dayanım kazandığını, dayanım artışının ise geleneksel betonlara kıyasla zamana bağlı olarak fazla artış göstermediği belirtilmektedir [7].
2. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemesi jeopolimer reaksiyonunun karmaşık yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir [6].
3. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Bu durum, jeopolimerlerin

oluşumu sonucu yapısında gözlenen N-A-S-H jellerinde suyun bulunmaması ve geleneksel betonlardaki gibi hacmi artan hidrasyon ürünleri oluşmamasından kaynaklanmaktadır [8].

4. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Varyans analizi, su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün basınç dayanımı üzerinde 0,495 oranında etki ettiğini göstermektedir. Jeopolimer betonlarda, aktivatör miktarının artması ile birlikte dayanımın artış gözleneceği literatürde yer almaktadır [14].

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Atig, Cement industry report. <https://www.atig.com.tr/arastirma/raporlar/t/r/cimento> (2015).
- [2] Engin. Y., Sustainability - Leading Role in Concrete Innovation, *Turkish Ready mixed concrete association*, June 2016, Pages 74-76
- [3] The European Cement Association, Activity Report <http://www.cembureau.be>, (2014).
- [4] Faten, S., Hani, K., Jan, W., 2013. Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Appl. Clay Sci.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.05>
- [5] Roy, D.M., Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 1999. 29(2): p. 249-254
- [6] J. Davidovits, *Geopolymers and geopolymeric materials*, *J. Therm. Anal.* 35 (no.2) (Mar. 1989) 429-441
- [7] Kaya, M. 2016, "Examination of mechanical and durability properties of various types of fly ash produced by using alkali activated mortars", *Sakarya University, The Graduate School Of Naturel and Applied Science, Civil Engineering Department, PhD thesis*
- [8] Rangan, B.V. 2008. "Fly ash-based geopolymer concrete". *Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology* SF:44, Perth, Australia.
- [9] Komljenovic, M., Bascarić, Z., Bradic, V. 2010. "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers". *J. Hazard. Mater.*, 181: 35-42

- [10] Bignozzi, M.C., Manzi, S., Natali, M.E., Rickard, W.D.A., Riessen, A. 2014. "Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na₂O/SiO₂ ratio. *Const. Build. Mater.*",69: 262-270.
- [11] Junaid, M.T., Kayali, O., Khennane, A., Black, J. 2015. "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes". *Construct. Build. Mater.*,79: 301-310.
- [12] TS EN 196-1:2005, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini.
- [13] <http://spssanalizi.com/> (01.02.2017)
- [14] Petermann, J.C., Saeed, A., Hammons, M.I. 2010. "Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review". *Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division*.