



**GEOPOLİMER BETONUN YANGIN DAYANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ
ALGORİTMALARI KULLANILARAK MODELLENMESİ**

Hazırlayan: Muhammed KAYA

1. DanışmanDanışman: Doç. Dr. Ahmet Emin KURTOĞLU

2. Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Necip Altay EREN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

Her Hakkı Saklıdır

IĞDIR/2023

T.C.
IĞDIR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GEOPOLİMER BETONUN YANGIN DAYANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ
ALGORİTMALARI KULLANILARAK MODELLENMESİ**

Muhammed KAYA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

IĞDIR/2023

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammed KAYA



ÖZET

GEOPOLİMER BETONUN YANGIN DAYANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK MODELLENMESİ

Kaya, Muhammed

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet Emin KURTOĞLU

2. Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Necip Altay EREN

Şubat-2023, 117 sayfa

Sıradan Portland çimentolu betonların üretimi esnasında çevreye çeşitli sera gazı (CO₂ gibi) salınımı yapması ve çimento ve beton üretiminde kullanılan doğal kaynakların tükenmesi, alternatif yapı malzemeleri arayışına neden olmuştur. Geopolimer beton iyi bir alternatif yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Geopolimer betonun yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir. Araştırılması gereken özelliklerinden biri ise yangına maruziyet sonrası basınç dayanımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat literatürde geopolimer betonun yangın dayanımını modelleyen çalışmalar oldukça az sayıdadır.

Yapay zeka uygulamalarının gün geçtikçe hızlanması ve gelişmesi umut vaat etmekte, bu problemin çözüme kavuşturulmasında kullanılacak en iyi yöntemlerin başında gelmekte mevcut veri analiz edilerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak mümkün olmaktadır. Bu amaçla yürütülen bu tezde literatürdeki geopolimer betonların yangın maruziyeti sonrası basınç dayanımını konu alan çalışmalar incelenmiş ve toplamda 332 deney verisi içeren bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti çeşitli yöntemlerle ön analize tabi tutulmuş ve modellemeye hazır hale getirilmiştir. Elde edilen bu veri seti kullanılarak Yapay Sinir Ağları, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman, Gboost, XGboost ve LightGBM algoritmaları ile 6 adet model eğitilmiştir. Eğitilen bu modeller çeşitli istatistik yöntemlerle değerlendirilmiş ve modellerin tahmin sonuçlarının literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. En iyi sonuçlar (en az hataya sahip) Gboost ve LightGBM modellerinden elde edilmiştir. Üretilen modeller kaydedilmiş ve Python kodları ile birlikte tez ekinde sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan geopolimer betonun kalan basınç dayanımının tahmininde makine öğrenmesi algoritmalarının oldukça umut verici sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Geopolimer, Geopolimer Beton, Makine öğrenmesi, Yüksek Sıcaklık, Kalan Basınç Dayanımı

ABSTRACT

MODELLING THE FIRE RESISTANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE VIA MACHINE LEARNING ALGORITHMS

KAYA, Muhammed

Master Thesis

Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Emin KURTOĞLU

2nd Advisor: Asst. Prof. Dr. Necip Altay EREN

February-2023, 117 pages

During the production of ordinary Portland cement concrete, various greenhouse gases such as CO₂ are emitted to the environment, and the depletion of natural resources used in cement and concrete production has led to a search for alternative building materials. Geopolymer concrete appears to be a good alternative building material, but one of the properties that needs to be investigated is its compressive strength after exposure to fire. However, there are relatively few studies modeling the fire resistance of geopolymer concrete in the literature.

The acceleration and development of artificial intelligence applications offer hope for finding the best methods for solving this problem by analyzing existing data to make predictions for the future. In this study, studies on the compressive strength of geopolymer concrete after exposure to fire in the literature were examined, and a dataset containing 332 experimental data was created. This dataset was pre-analyzed using various methods and prepared for modeling. Using this dataset, six models were trained with Artificial Neural Networks, Support Vector Machines, Random Forest, Gboost, XGboost, and LightGBM algorithms. These trained models were evaluated using various statistical methods, and it was found that the prediction results of the models were consistent with the studies in the literature. The best results (with the least error) were obtained from the Gboost and LightGBM models. The produced models were saved and presented in the thesis with Python code. Machine learning algorithms showed promising results in predicting the residual compressive strength of geopolymer concrete exposed to high temperatures.

Keywords: Geopolymer, Geopolymer Concrete, Machine Learning, Elevated Temperature, Residual Compressive Strength

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Emin KURTOĞLU'na,

Çalışmanın yöntemi konusunda tezime yardımcı olan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Necip Altay EREN'e,

Gönüllü olarak çalıştığım süre boyunca desteklerini esirgemeyen Iğdır Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Dr. Öğretim Üyesi Fevzi DAŞ ve diğer hocalarıma,

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	8
1.2. Tezin Kapsamı.....	9
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerine Etki Eden Parametreler	10
2.1.1. Alkali aktivatör- Bağlayıcı oranı	10
2.1.2. Kür koşulları	12
2.1.3. Alkali hidroksitin molaritesi (konsantrasyonu)	14
2.1.4. Alkali hidroksit – Alkali silikat oranı	16
2.1.5. Agregat etkisi.....	17
2.1.6. Suyun etkisi	20
2.1.7. Süperakışkanlaştırıcı katkı etkisi	20
2.2. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Geopolimer Beton ve Portland Çimentolu Betonların Davranışı	22
2.2.1. Dayanım kaybının incelenmesi	24
2.2.2. Kütle kaybının incelenmesi	27
2.2.3. Lif katkısının yangın dayanımına etkisi	31
2.3. Geopolimer Betonun Yangın Dayanımının Modellenmesi.....	32
3. METARYAL VE METOT	34
3.1. Verilerin Toplanması ve Analizi	35
3.2.Makine Öğrenmesi Algoritmaları	45
3.2.1. Yapay sinir ağları.....	45
3.2.2. Destek vektör makinesi.....	47
3.2.3. Rastgele orman	48

3.2.5. Gboost (Gradyan Güçlendirme)	49
3.2.7. LightGBM	51
3.2.8. Aşırı (overfitting) ve eksik (under fitting) öğrenme	52
3.3. Makine Öğrenmesi Modellerinin Oluşturulması ve Analizi	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	56
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
6. KAYNAKÇA	67
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	118



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Si	.....	Silisyum
Al	.....	Alüminyum
C-S-H	.....	Kalsiyum silikat hidrat
Ca(OH)₂	.....	Kalsiyum hidroksit
CO₂	.....	Karbon dioksit
Na⁺		Sodyum iyonu
OH⁻		Hidroksit iyonu
MPa	.....	Mega paskal
M	.....	Molarite
NaOH	.....	Sodyum hidroksit
Na₂SiO₃	.....	Sodyum metasilikat
KOH	.....	Potasyum hidroksit
K₂SiO₃	.....	Potasyum meta silikat
pH	.....	Potansiyel hidrojen
mm	.....	Milimetre
SP	.....	Süperakışkanlaştırıcı
XRD	.....	X-ışını difraksiyonu
GPC	.....	Geopolimer beton
PVA	.....	Polivinil alkol
ANN	.....	Yapay sinir ağları
SVM	.....	Destek vektör makinesi
SVR	.....	Destek vektör regresyonu
R	.....	Korelasyon katsayısı
R²	.....	Tanımlayıcılık katsayısı
NS	.....	Nano silika
MS	.....	Mikro silika
SBL	.....	Stiren-bütadien lateks
RMSE	.....	Ortalama karesel hatanın karekökü
COV	.....	Kovaryans
GGBS	.....	Yüksek fırın cürufu
MK	.....	Metakaolin
FA	.....	Uçucu kül
VT	.....	Volkanik tüf
BA	.....	Bambu külü
T	.....	Sıcaklık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Si/Al oranlarına bağlı farklı geopolimer sistemleri (Davidovits, 2002)	5
Şekil 1.2 Geopolimerizasyona ait kavramsal model (Duxson vd., 2007).....	6
Şekil 1.3 Geopolimer betonun üretim aşamaları(Q. Wang vd., 2022)	7
Şekil 2.1 Sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranı 1.5 olan numunelerin basınç dayanımına farklı molarite ve alkali aktivatör/bağlayıcı (l/b) oranlarının etkisi (Ghafoor vd., 2021)	12
Şekil 2.2 Agregada boyutunun geopolimer betonun yangın dayanımına etkisi (Kong ve Sanjayan, 2010).....	18
Şekil 2.3 Agregada içeriğinin 3, 7 ve 28 günlük uçucu kül esaslı geopolimer numunelerinin basınç dayanımına etkisi (Chithambaram vd., 2018)	19
Şekil 2.4 Süperakışkanlaştırıcı katkısının geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi (Hardjito vd., 2004).....	21
Şekil 2.5 Geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklık altında kaba agregada ezilme indeksi ve basınç dayanımı (H. Zhang vd., 2020).....	25
Şekil 2.6 Geopolimer beton numunelerinin kalan basınç dayanımının yüksek sıcaklık altında değişimi (H. Zhang vd., 2020)	26
Şekil 2.7 Kontrol ve rubberized geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımının sıcaklık altındaki değişimi (Luhar vd., 2018)	27
Şekil 2.8 Yüksek sıcaklık etkisinde kütle kayıpları (Mallikarjuna Rao vd., 2019)	30
Şekil 2.9 Geopolimer beton numunelerinin farklı sıcaklıklar altındaki basınç dayanımı (Kantarci vd., 2021)	31
Şekil 3.1 Çalışmanın yöntemine ait akış şeması.....	34
Şekil 3.2 Veri setine ait frekans dağılımı grafikleri:(a) Molarite, (b) Bağlayıcı malzeme (c) Alkali aktivatör, (d) maksimum agregada boyutu, (e) Agregada içeriği, (f) Alkali aktivatör/Bağlayıcı oranı, (g) Alkali silikat/Alkali hidroksit oranı, (h) extra su, (i) Kür çeşidi, (i) Kür sıcaklığı, (j) Yangın deneyi süresi, (k) Maksimum yangın deneyi sıcaklığı, (l) Soğutma şekli, (m) Sıcaklık, (n) Basınç dayanımı	41
Şekil 3.3 Veri setine ait korelasyon katsayıları.....	42
Şekil 3.4 Yapay sinir ağının yapısı (Shalev-Shwartz ve Ben-David, 2014).....	45
Şekil 3.5 Yapay sinir ağları işlem elemanı	46
Şekil 3.6 Destek vektör makinesi hiper düzlem gösterimi	47
Şekil 3.7 N adet ağaçtan oluşan rastgele orman bileşenleri.....	48
Şekil 3.8 Gboost ağaçları	49

Şekil 4.1 Model sonuçlarına ait değerlendirme metrikleri: :(a) Ortalama test/tahmin, (b) standart sapma, (c) Kovaryans, (d) $RMSE$, (e) R , (f) R^260

Şekil 4.2 Eğitilen tüm modellere ait gerçek ve test değerlerinin dağılımları: (a) ANN, (b) SVR, (c) Rastgele Orman, (d) LightGBM, (e) Gboost, (f) XGBoost61

Şekil 4.3 Eğitilen modellere ait input ağırlıkları: (a) ANN, (b) SVR, (c) Rastgele orman, (d) Gboost, (e) XGboost, (f) LightGBM63



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1 Alkali ile aktive edilmiş materyallerin tarihsel gelişimi (Li vd., 2010).....	3
Çizelge 3.1 Veri setine ait kaynak özeti.....	36
Çizelge 3.2 Veri setine ait istatistiksel değerler	38
Çizelge 3.4 Veri setinde yer alan parametreler ve alt parametreleri.....	44
Çizelge 3.5 Yeni eklenen kukla değişkenler dahil tüm parametreler	44
Çizelge 3.6 Model hiper parametrelerinin varsayılan değerleri ve arama yapılan aralıklar	54
Çizelge 3.7 Tüm modellere ait en iyi hiper parametre değerleri	55
Çizelge 4.1 Model değerlendirme metriklerine ait sonuçlar.....	57
Çizelge 4.2 Eğitilen modellere ait eğitim ve test skorları	57

1.GİRİŞ

İlk Antik bağlayıcılar kalsine kil ile sönmüş kireç kombinasyonu ile üretilmiş, 6 bin yıldan çok önce kullanılmıştır. Türkiye'nin doğusunda 12000 ile 5000 arasına ait ve bağlayıcı olarak kireç taşı kullanılan bir terrazzo zemin bulunmuştur. Benzer şekilde Sırbistan-Karadağ'da bulunan bir balıkçı kulübesinde milattan önce 5600 yılına ait olduğu düşünülen bir döşeme bulunmuştur. Claudius Kemerli, Fabricius Köprüsü ve benzeri antik yapılar harçların gücünden dolayı binlerce yıl ayakta kalabilmiştir (Badar, 2014).

1940'larda Purdon'un çalışması ile geopolimerlerin gelişimi büyük bir gelişme göstermiştir. Yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksit ile aktive eden Purdon, meydana gelen reaksiyonun iki adımda gerçekleştiğini belirtmiştir. İlk olarak, silika, alüminyum ve kalsiyum hidroksitin serbest bırakılmasının gerçekleştiği ve sonraki aşamada alkali çözeltinin yenilenmesi ile birlikte, silika ve alümin hidratların oluşumunun da gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca alkali hidroksitin katalizör görevi gördüğünü tespit etmiştir (Badar, 2014).

Araştırmalar Batı Avrupa'da başlasa da orada devam etmemiş, 1980'lere kadar sınırlı kalmıştır. Araştırmalar birkaç on yıl boyunca doğuya, Sovyetler Birliği ve Çin'e kaymıştır. Çimento kıtlığı, bu ülkelerin araştırmacılarını ve üreticilerini alternatif malzemeler aramaya yöneltmiştir. Glukhovsky, metalürjik cürufların alkali-karbonat aktivasyonuna odaklanan ilk ve en seçkin araştırmacıydı. Glukhovsky ayrıca antik Roma ve Mısır binalarında kullanılan çimento bağlayıcıları araştırmıştır. Yaptığı çalışmalarla bin yıl boyunca ayakta kalan bu anıtların, alkali bakımından zengin olup son derece dayanıklı olan puzolan harçlarından oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca Glukhovsky, Portland çimentosu ile yer kabuğunda bulunan diğer minerallerin bileşimleri arasındaki farkı açıklamaya odaklanmıştır. Daha sonra "Toprak-çimento" adını verdiği geopolimer bağlayıcı geliştirmiştir. Yer altı kayaçlarını temsil etmek için toprak ve çimentolu özelliklerini temsil etmek için çimento kelimelerini kullanmıştır. "Toprak-çimento", alkali bakımından zengin endüstriyel atıklarla karıştırılarak öğütülmüş alümino-silikatlardan oluşmaktaydı (Roy, 1999).

1970'lerde, Fransız bilim adamı Joseph Davidovits, metakaolinin alkali

aktivasyonuna dayanan bağlayıcılar geliştirmiş ve patentini almıştır. Bu yeni bağlayıcıya Geopolymer adını vermiştir. Davidovits, piramitlerin Romalılar ve Mısırlılar tarafından kullanılan yollarla benzer bir şekilde yapıldığını savunmuştur. Piramitlerin doğal taştan değil, insan yapımı bağlayıcılardan yapıldığını söylemiştir. Kimyasal ve mineralojik çalışmalara dayanan araştırmasında, piramit bloklarının kalker kumu, kalsiyum hidroksit, sodyum karbonat ve su karışımından oluştuğunu belirtmiştir. Araştırmalarına dayanarak, piramit bloklarının doğal taşlardaki mevcut şekli ile fosilleşmiş kalsiyum katmanlarından oluşmadığını, yapay bir bağlayıcıda olduğu gibi rastgele bir şekilde dağıldığını söylemiştir. Toplanan numunelerin XRD kırınım modellerinde gözlemlendiği gibi, ana kristal fazın kalsiyum karbonat olduğu sonucuna varmıştır. Davidovits, geopolimerin ampirik formülünü tanımlamıştır. Geopolimerler üretmek için alüminosilikat kaynağı öncülü alkali bir sodyum veya potasyum çözeltisi ile karıştırmıştır. Bağlayıcılarda bulunan Al-Si minerallerinin, Si-O-Al-O bağlarını oluşturduğunu belirtmiş ve geopolimer bileşiminin Si/Al oranına bağlı olduğunu belirtmiştir. Geopolimerin temel yapısını $Mn[-(Si-O_2)_z-Al-O]_n \cdot w H_2O$ olarak tanımlamıştır. Bu formüldeki n değeri polimerizasyonun derecesini, z Si/Al oranını ve M ise sodyum ya da potasyumu temsil etmektedir. Bu orana dayalı olarak, şu bağlar oluşturulur: sırasıyla z = 1, 2, 3 için poli(sialate), poli(sialatesiloxo) ve poli(sialate-disiloxo) (Davidovits, 2020).

Özellikle geopolimerlerin mineralojik ve mikro yapısal özelliklerini tanımlayabilen yeni tekniklerin geliştirilmesi ve sürdürülebilirliğe gösterilen ilgi nedeniyle, son zamanlarda geopolimerleri konu alan araştırmalar çarpıcı bir şekilde artmıştır. 1990'lardan sonra bu konudaki araştırmalar, dünya çapında faaliyet gösteren 100'den fazla aktif araştırma merkezi ve her kıtada yer alan ayrıntılı araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile dünyanın her köşesine yayılmıştır (Provis ve VanDeventer, 2014). Geopolimerlerin tarihsel gelişimindeki önemli olayların bir özeti Çizelge 1.1'de gösterilmiştir (Li vd., 2010).

Çizelge 1.1 Alkali ile aktive edilmiş materyallerin tarihsel gelişimi (Li vd., 2010)

Yazar	Yıl	Çalışma Konusu
Feret	1939	Çimento İçin Kullanılan Cüruflar
Purdon	1940	Alkali Cüruf Kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkali Çimentoların Teorik Temelleri Ve Gelişimi
Davidovits	1979	“Geopolimer” Teriminin Literatüre Girişi
Malinowski	1979	Antik Su kemerlerinin tanımlanması
Forss	1983	F-çimento(cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemeleri tanımı
Davidovits ve Sawyer	1985	"piramit" çimento patenti
Krivenko	1986	Doktora tezi, R ₂ O-RO-SiO ₂ -H ₂ O
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melilit cüruflarının aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cürufllu çimento - düşük seviyeli radyoaktif atık formları
Davidovits	1987	Eski ve modern betonların karşılaştırılması
Deja ve Malolepsy	1989	Alkali karışımlardan oluşan adyabatik kürlenmiş nükleer atıklar
Roy ve Langton	1989	Antik beton analogları
Majundar vd.	1989	C ₁₂ A ₇ – cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali ile aktive edilmiş cüruf
Wu vd.	1990	Cürufllu çimentonun aktivasyonu
Roy vd.	1991	Alkali ile aktive edilmiş cürufun hızlı prizi
Roy ve Silsbee	1992	Alkali ile aktive edilmiş cüruf – Genel bir bakış
Palomo ve Glasser	1992	CBC with metakaolin
Roy and Malek	1993	Cürufllu çimento
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek çağın betonları
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scrivener	1995	Alkali ile aktive edilmiş cürufun mikro yapısı
Shi	1996	Alkali ile aktive edilmiş cürufun geçirgenliği, dayanımı ve boşluk yapısı
Fernandez-Jimenez ve Puertas	1997	Alkali ile aktive edilmiş cürufa ait kinetik çalışmalar
Katz	1998	Alkali ile aktive edilmiş uçucu külün mikro yapısı
Davidovits	1999	Geopolimer sistemlerin kimyası, teknoloji
Roy	1999	Geopolimer sistemin kimyası , teknolojisi
Palomo	1999	Alkali aktive edilmiş çimentoların avantaj ve dezavantajı
Gong and Yang	2000	Alkali ile aktifleştirilmiş kırmızı çamur cüruf çimentosu
Puertas	2000	Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf çimentosu
Bakharev	2001	Alkali ile aktifleşen cüruf betonu
Palamo ve Palacios	2003	Tehlikeli atıkların immobilizasyonu
Grutzeck	2004	Zeolit oluşumu
Sun	2006	Sialite teknolojisi
Duxson	2007	Geopolymer teknolojisi: en son teknoloji
Hajimohammadi vd.	2008	Tek bileşenli geopolimer
Provis ve van Deventer	2009	Geopolymers: yapı, işleme, özellikler ve endüstriyel uygulamalar
Bondar vd.	2011	Doğal Puzolanların alkali aktivasyonunda ilerleme
Pacheco-Torgal vd.	2014	Alkali ile aktive olan çimentolar, harçlar ve betonlar el kitabı

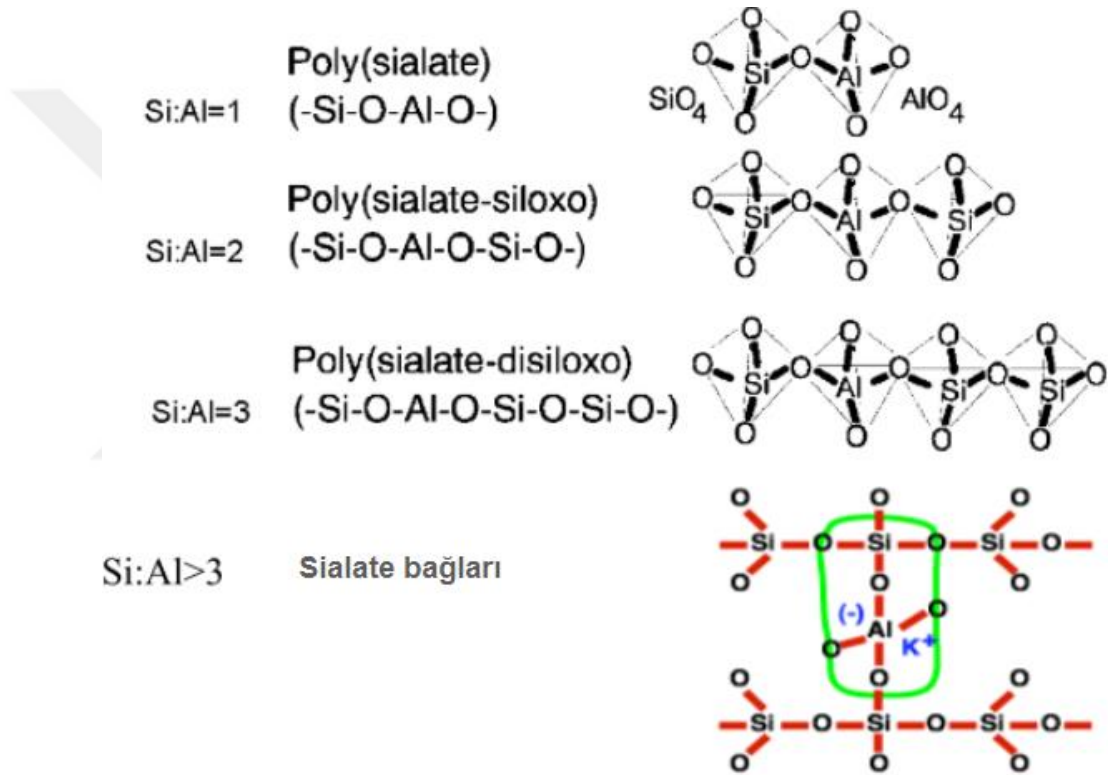
Geleneksel yöntemlerle üretilen betonlar ülkemizde ve dünyada sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzemedir. Beton üretiminde bağlayıcı olarak çimento kullanılmakta ve bu yüzden çok yüksek miktarda çimento üretimi gerekmektedir. Çimento üretiminde yüksek miktarda enerji tüketimi gerekir ve sera gazı etkisi yaratan CO₂ gazı atmosfere salınmaktadır (Niveditha ve Koniki, 2020). 2021 yılında dünya çapında çimento üretimi 4.4 milyar m³ iken, sadece Çin 2.5 milyar m³ ve Hindistan ise 330 milyon m³ beton üretmiştir. Atmosfere salınan CO₂ gazının %5 ile %7 sinin çimento üretiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Her bir ton çimento için bir ton CO₂ gazı açığa çıkar ve bunun nedeni sadece betonun CO₂ gazı üretmesi değil buna ek olarak üretim esnasında hammaddeleri yeteri sıcaklığa ulaştırmak için fosil yakıt kaynaklarının kullanılmasıdır (Mcnulty, 2009).

Portland çimentosunun aksine geopolimer bağlayıcılı çimentolar daha az CO₂ salınımına neden olur. Bunun nedeni geopolimerlerin kimyasal reaksiyonla CO₂ gazı üretmemesi ve geopolimer bağlayıcıların üretiminde Portland çimentosunun üretimindeki gibi yüksek CO₂ gazı salınımının olmamasıdır (Mcnulty, 2009). Geopolimerler farklı şekilde üretilir, yüksek yakıt giderleri ve yüksek sıcaklık fırını gerektirmezler. Geopolimerlere ait jeolojik kaynaklar bütün kıtalarda bol miktarda bulunmaktadır. Bu yüzden geopolimerlerin kullanımı malzeme ve fabrika yatırımı gerektirmemektedir. Düşük CO₂ salınımı yapan geopolimerlerin kullanımı sadece çevresel açıdan değil, ayrıca inşaat sektörü ve beton endüstrisinin CO₂ salınımını %80 oranında düşürmektedir (Davidovits, 1994).

Alüminosilikat kaynağı öncüller ve alkali madde arasındaki reaksiyon yoluyla üretilen geopolimerler, sertleştikten sonra yarı kristal amorf bir malzemenin oluşturan inorganik bir sentetik polimerdir (Wang vd., 2005). Sertleşme reaksiyonu, geopolimerin bileşimine bağlı olarak hem ısı kürü ortamında hem de oda sıcaklığında gerçekleşebilir. Geopolimerler üretmek için kullanılabilecek çok çeşitli öncüller vardır. Geopolimerlerin üretimi için kullanılan en yaygın öncüller, metakaolin ve endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül, maden atıkları, kırmızı çamur ve cürufur gibi malzemelerdir. Ayrıca volkanik kül esaslı geopolimerler üzerine de çalışmalar vardır. (Castillo vd., 2021).

Geopolimerler, yaygın kullanılan şekli ile inorganik polimer olarak bilinir. "Geopolimerizasyon" olarak bilinen bir işlemde polikondenzasyon reaksiyonları yoluyla

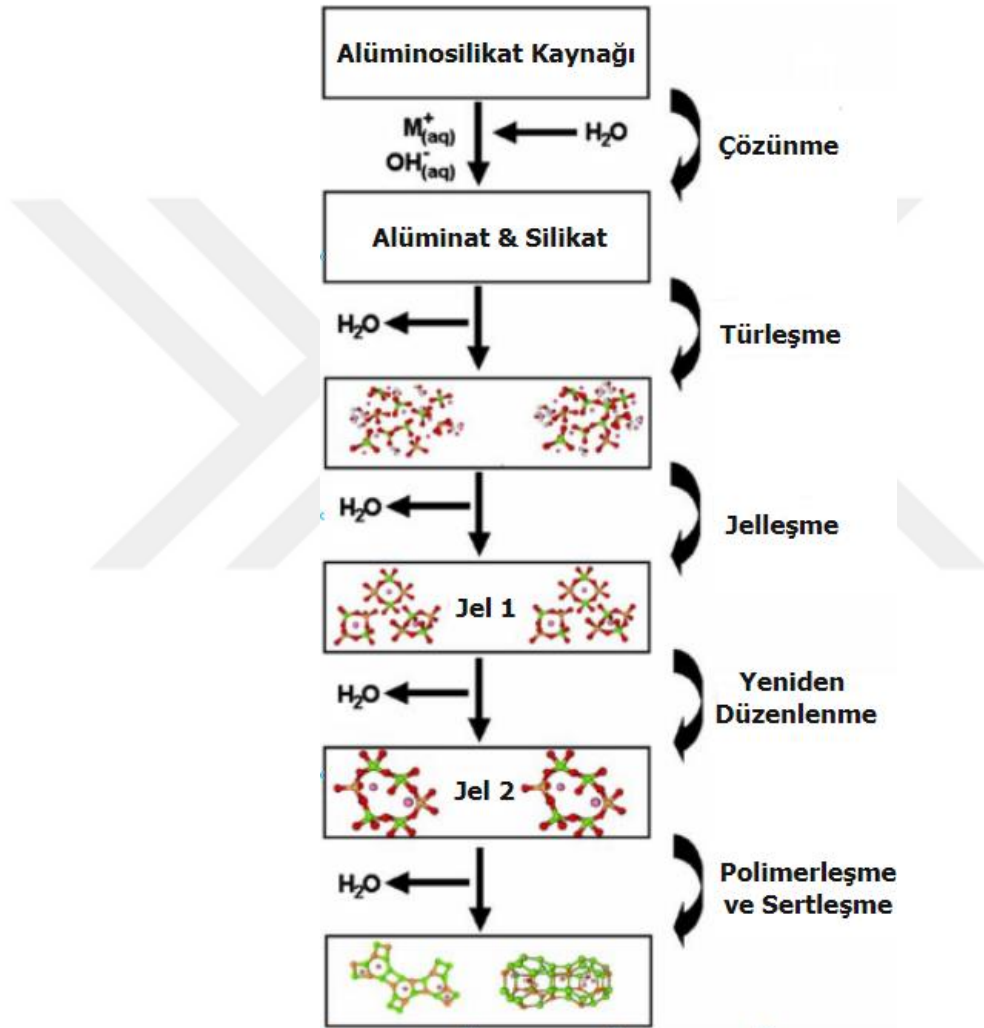
sentezlenirler. Geopolimer kelimesi Davidovits tarafından icat edilmiştir. "Geo" ön eki, polikondenzasyon reaksiyonu yoluyla bağlayıcı oluşturmak üzere alkali bir çözelti ile reaksiyona giren jeolojik malzemelere dayalı inorganik alüminosilikatı sembolize etmektedir. Geopolimer yapısı için önerilen terminoloji (Şekil 1.1) Si/Al oranlarına bağlı olarak poli(sialat), poli(sialat silokso) ve poli(sialat-disilokso) olmak üzere üç temel forma ayrılmaktadır (Duxson vd., 2007).



Şekil 1.1 Si/Al oranlarına bağlı farklı geopolimer sistemleri (Davidovits, 2002)

Bir öncül ile alkali aktivatör karıştırıldığında alkali hidroliz meydana gelmekte ve alüminosilikatlar alkali çözeltisi içinde çözünmektedir (Şekil 1.2). Bunun sonucunda, büyük ölçüde alüminat ve silikat türlerinden oluşan bir sulu faz oluşmaktadır. Alkali çözeltideki pH'nın yüksek olması ve sisteme ısı eklenmesi nedeniyle, alüminosilikatların çözünmesi hızlıca gerçekleşmekte ve aşırı doymuş bir alüminosilikat çözeltisi oluşmaktadır. Ardından jel oluşumuyla sonuçlanan bir dizi hızlı polikondenzasyon reaksiyonu meydana gelmektedir. Bu süreç boyunca çözünme sırasında hidroliz ile tüketilen su tekrar açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu su, jelin gözeneklerinde

tutulmaktadır. Sistem yeniden organize olmaya devam ettikçe jel yapısının bağlanabilirliği artmaktadır. Bu sayede esas olarak silika ve reaktif alüminadan oluşan üç boyutlu bir alüminosilikat ağı oluşmaktadır. Polimerleşme ve kristalleşme devam ettikçe su jel yapısından uzaklaştırılmakta, bu da sertleşmiş geopolimerin makro yapısını oluşturan katı bir mikro yapı ile sonuçlanmaktadır (Sundberg, 2018).

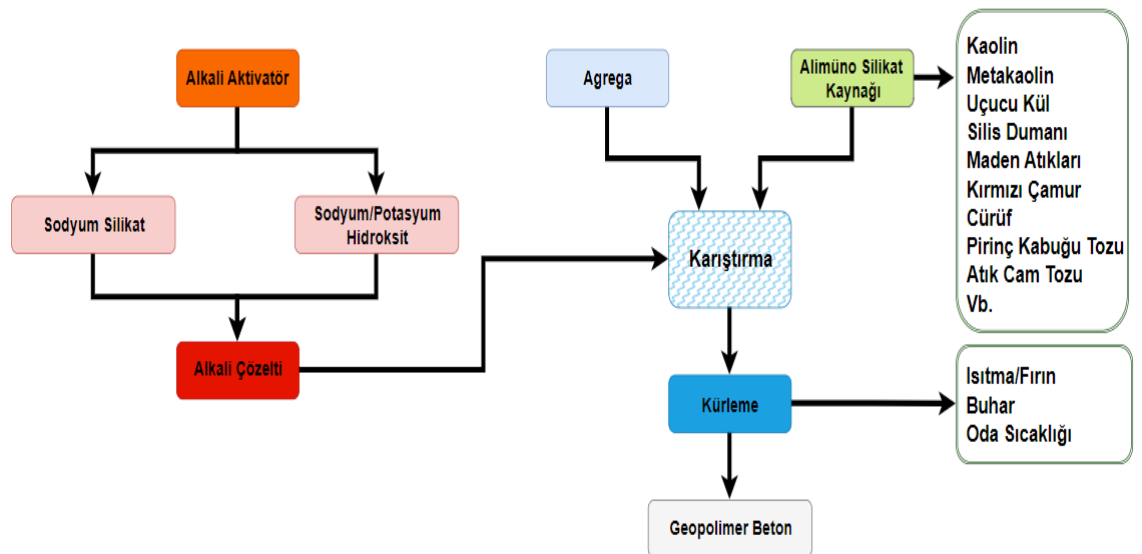


Şekil 1.2 Geopolimerizasyona ait kavramsal model (Duxson vd., 2007)

Bu süreç, benzer bir şekilde moleküler düzeyde de tarif edilebilmektedir. Sodyum hidroksit bazlı aktivatörde Na^+ ve OH^- iyonları H_2O (su) ile çözelti halindedir. Çoğu öncül, kovalent olarak bağlı Al^{+3} ve Si^{+4} içermektedir. Öncül çözeltiye dahil edildiğinde, Si^{+4} iyonları OH^- iyonlarını çekmektedir. Bu hidroksit iyonlarının çekimi silisyumu alüminosilikattan uzaklaştırmak için yeterli olduğunda, çözeltide tetrahedral (düzgün dört yüzlü) olarak koordineli bir silikat oluşmaktadır. Benzer şekilde, Al^{+3} ile OH^- iyonları ile birleşmekte ve çözelti içinde çözülmemektedir ve tetrahedral bir yapıya

sahip reaktif alümina oluşturmaktadır. Aşırı doygunluğa ulaşıldığında, alümina moleküllerindeki OH^- iyonları, silika moleküllerindeki OH^- iyonları ile kondenzasyon reaksiyonları yoluyla birleşerek polimer zincirlerini oluşturmaya başlamaktadır. Bu işlem, bir jel oluşturmak için oksijen bağlarıyla bağlanan Al ve Si atomlarından oluşan zincirlere ek olarak fazla sayıda su molekülü üretilmesine neden olmaktadır. Açığa çıkan bu su, daha fazla bağ oluşması ve polimer zincir ağının yoğunlaşması nedeniyle jel yapısından uzaklaştırılmaktadır. Çözeltideki Na^+ iyonları, elde edilen alüminosilikatların negatif yüklü olması nedeni ile polimer ağına çekilmektedir. Ağın bağlanabilirliği artmaya devam ettikçe, jel üç boyutlu bir nanokristal yapı oluşturmaktadır. Na^+ iyonları, kimyasal kararlılığı korumak için matrise dahil edilmektedir. Elde edilen bağlayıcı, bir beton karışımında Portland çimentosu yerine kullanılabilecek olan bir geopolimerdir (Sundberg, 2018).

Geopolimer betonun hazırlaması için gerekli olan malzemeler genel olarak bir alkali çözelti, geopolimer ve agregadır. Portland çimentosuna benzer bir şekilde geopolimer hamur kaba agregaları, ince agregaları ve diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri birbirine bağlamaktadır. Portland çimentolu betonda olduğu gibi, agregalar geopolimer betonda da en büyük hacmi (kütlece yaklaşık %75-%80) işgal etmektedir(Hardjito ve Rangan, 2005). Geopolimer betonun üretim aşamaları Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3 Geopolimer betonun üretim aşamaları(Q. Wang vd., 2022)

Geopolimer beton üzerinde yapılan çalışmalara bakıldığında, Portland çimentolu betona göre bazı özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Geopolimer beton yangına dayanıklı bir malzemedir. Portland çimentolu beton ile karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

- Geopolimer beton donma ve çözünme etkilerine dayanıklıdır. Portland çimentolu betona kıyasla %80 daha az CO₂ salınımına neden olmaktadır.
- Kimyasal direnci oldukça yüksektir.
- Geopolimer beton üretiminde doğal kaynakların yerine atık malzemeler kullanılabilir.
- Portland çimentolu beton ile aynı miktarda geopolimer beton üretiminde daha az enerji sarfıyatı olmaktadır (Hassan vd., 2019).
- Bütün bu avantajlarının yanında geopolimer betonun bazı dezavantajlı yönleri de bulunmaktadır:
- Geopolimer beton üretilirken kullanılan alkali çözeltisi pahalıdır.
- Geopolimer beton kırılkan olduğundan, yüksek darbe yükü etkisinde geniş yayılma çatlakları oluşturacak ve gevrek kırılacaktır. Bu da yapılarda istenmeyen bir durumdur.
- Geopolimer beton ilk döküldüğünde dayanımındaki artış kürlenme durumundan etkilenir. Geopolimer betonun dayanım kazanması için genellikle yüksek sıcaklığa ihtiyaç vardır.
- Geopolimer beton üretiminde kullanılan aktivatör çözeltisi alkali özellik gösterdiğinden, doğrudan temas halinde çeşitli yaralanmalara neden olmaktadır (Zerfu ve Ekaputri, 2016).

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, kısaca geopolimer betonların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kalan basınç dayanımının makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak tahmin edilmesidir. Bu konunun seçilmesinin nedeni literatürde geopolimer betonların yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası davranışını modelleyen çalışmaların az olması ve Portland çimentolu betonlara kıyasla geopolimer betonların birden çok avantajlı

yönlerinin olmasıdır. Yürütülen bu çalışma sayesinde ileride üretilecek çalışmalara standartlara ön ayak olunması hedeflenmekte ve sonuç olarak geopolimer betonların kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunmak istenmektedir. Bu kapsamda literatür taraması yapılmış, geopolimer betonun yangın dayanımını araştıran çeşitli çalışmalar incelenmiştir. İncelenen bu çalışmalardaki sonuçlar doğrultusunda makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak eğitilen modellere ait bağımlı ve bağımsız parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelere göre incelenen çalışmalardan veriler toplanarak veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan bu veri seti kullanılarak modeller eğitilmiştir. Farklı performans değerlendirme yöntemleri yardımı ile oluşturulan bu veri setine uygun modeller seçmeye çalışılmıştır. En iyi performans gösteren modellerin sonuçlarının literatür ile uyumu incelenmiştir.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tezin birinci kısmındaki giriş bölümünde geopolimerlerin tarihsel gelişimi, kimyasal özellikleri, geopolimerizasyon süreçleri, geopolimer betonun avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmektedir. Ayrıca tezin amacı ve tez kapsamı da bu bölümde açıklanmaktadır.

Tezin ikinci kısmında, literatürde geopolimer betonun yangın dayanımını inceleyen çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar verilerin toplanmasında referans alınacak olan parametrelere göre ayrı başlıklar altında verilmiştir.

Tezin üçüncü kısmında, oluşturulan veri setinin nasıl toplandığı, analiz edildiği ve modellemeye hazır hale getirildiği anlatılmıştır. Bu veri seti ile eğitilecek olan modellerde kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarının teorik temellerine değinilmiştir. Son olarak modellerin nasıl oluşturulduğu ve analiz edildiğine değinilmiştir.

Tezin dördüncü kısmındaki araştırma bulguları ve tartışma bölümünde modellere ait skorlar verilmiş ve çeşitli değerlendirme metrikleri ile modellerin doğruluğu tartışılmıştır.

Tezin beşinci ve son kısmında dördüncü bölümde yapılan değerlendirmeler sonucu elde edilen bulgular incelenmiş ve literatür ile uyumuna değinilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler bu bölümde verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerine Etki Eden Parametreler

Geopolimer betonunun mekanik özellikleri yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra veya normal koşullar altında çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelerin başında bağlayıcı olarak kullanılan öncülün çeşidi, kür koşulları, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, alkali çözeltideki alkalilerin çeşidi, alkali hidroksitin molaritesi, alkali silikatın alkali hidroksite oranı, agrega çeşidi, agrega miktarı, agrega boyutu ve su içeriği gibi parametreler yer almaktadır. Bu parametreler geopolimer beton karışımı hazırlanırken kullanılan malzemelere göre ve bu malzemelerin oranları ile değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin herhangi birindeki değişim doğrudan ya da dolaylı olarak diğer parametrelerin değişime neden olabilir. Bunların yanı sıra geopolimer beton numunelerinin dökümünden ya da yüksek sıcaklığa yani yangına maruz kaldıktan sonraki dayanımını etkileyen parametreler bulunmaktadır. Kür şekli, kür süresi, kür sıcaklığı, soğutma şekli, sıcaklık fırını ısıtma oranı ve yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi bu faktörlere örnek verilebilir. Dayanıma etkiyen başlıca faktörler sonraki bölümlerde ayrı başlıklar altında incelenecektir.

2.1.1. Alkali aktivatör- Bağlayıcı oranı

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ile ölçülen, geopolimer hamuru içinde birim hacim başına mevcut aktivatör miktarını temsil eden bu değer geopolimerlerin yüksek sıcaklıklar altındaki performansında önemli bir rol oynamaktadır. Alkali aktivatör çözeltisinde alkali silikatlar kullanıldığından, aktivatör miktarının artması silikat/alüminyum (Si/Al) oranını da artırdığından geopolimer betonun dayanımını etkilemektedir.

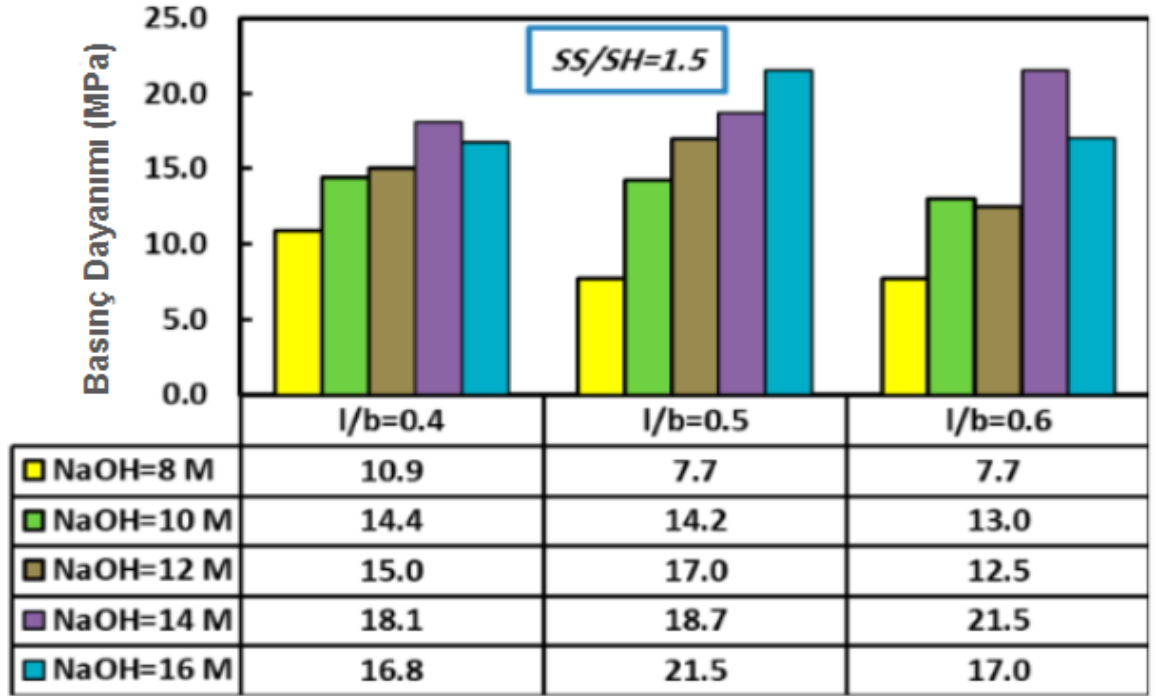
Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı yalnızca elde edilen geopolimerin fiziksel özelliklerini etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda reaksiyon ürünlerinin oluşum sürecinde de önemli rol oynamaktadır. Alkali katyonların (Na^+) konsantrasyonu ve sistemde bulunan su miktarı, reaksiyon ürünlerinin bileşimini ve yapısını belirlemektedir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranındaki artışın, termodinamik stabilite nedenleriyle zeolitlerin ve N-A-S-H jellerinin oluşumunu desteklediği gözlemlenmiştir. Alkali çözeltinin artmasıyla, sistemdeki OH^- iyonları ve su miktarında bir artışa neden olmakta, bu da ortamdaki zayıf polimerize edilmiş reaktif türlerin

oranında bir artışa neden olmaktadır. Ancak bu durum aynı zamanda polimerizasyonu da engellemektedir (Ruiz-Santaquiteria vd., 2012).

Joseph ve Mathew (2012) yaptıkları çalışmada, farklı alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarına sahip uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için bir deney yapmışlardır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranının 0.55'e kadar arttıkça basınç dayanımının önemli ölçüde arttığı ve bunun ötesinde geopolimer betonunu mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Tüm değişkenler sabitken 60 °C, 80 °C ve 100 °C deki farklı kürleme sıcaklıkları ve ek olarak sırasıyla 0.35, 0.45, 0.55 ve 0.65 alkali aktivatör/bağlayıcı oranları ile 39 MPa, 47 MPa, 58 MPa ve 44 MPa'lık basınç dayanımları elde edilmiştir.

Bakri ve diğerleri (2013) yaptıkları çalışmada alkali aktivatör/bağlayıcı oranları 0.30, 0.35, 0.40 olan uçucu kül bazlı geopolimer beton numuneleri hazırlamış ve bunları 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda test etmişlerdir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranını 0.30'dan 0.40'a yükseltmenin, basınç dayanımını iki katından fazla artırdığını ve en yüksek değer 0.40 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip olan numunenin verdiğini söylemişlerdir.

Ghafoor vd., (2021) yürüttüğü çalışmada, alkali aktivatör/bağlayıcı oranındaki artışın geopolimer betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı azalttığı sonucuna varmışlardır. 0.5 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerin optimum basınç ve eğilme dayanımları elde ettiği görülmüştür. Ortam sıcaklığında kürlenerek düşük molarite değerine sahip numunelerin basınç dayanımının alkali aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca geopolimer betonun basınç dayanımında 8M, 10M, 12M, 14M ve 16M sodyum hidroksit konsantrasyonlarına sahip numuneler için, alkali aktivatör/bağlayıcı oranının 0.5'ten 0.6'ya yükseltilmesiyle sırasıyla yaklaşık %6.1, %8.8, %13.8, %22.2 ve %14 oranlarında azalma olduğu görülmüştür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranı 1.5 olan numunelerin basınç dayanımına farklı molarite ve alkali aktivatör/bağlayıcı (l/b) oranlarının etkisi (Ghafoor vd., 2021)

2.1.2. Kür koşulları

Kür sıcaklığı geopolimer betonun priz alma süresine, dayanıklılığına ve mikroyapı gibi özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. Sıradan Portland çimentolu betonda olduğu gibi, geopolimer beton numuneleri döküldükten sonra bakım ve kür işlemlerinin dayanım üzerine olumlu etkileri olmaktadır. Ayrıca ısı kürü sonucunda diğer kimyasal tepkimelerde olduğu gibi geopolimer betonda geopolimerizasyon süreci hızlanmakta ve daha hızlı dayanım kazanılmış olmaktadır. Isı kürünün yanı sıra geopolimer beton numunelerine oda koşulları ve su ortamında da kür uygulaması yapılmaktadır.

Yüksek ortam sıcaklığında kürlenmiş geopolimer beton numuneleri dört saatte nihai dayanımının büyük kısmına ulaşmaktadır. Ancak 10 °C'nin altındaki bir ortam sıcaklığında taze betonun dayanım kazanması dört gün kadar sürmektedir. Yine aynı şekilde bir gün boyunca ısı kürü uygulanan geopolimer beton numuneleri nihai dayanıma ulaşırken, ısı kürü uygulanmamış geopolimer beton numuneleri bu dayanıma

ancak 28 günde ulaşabilmektedir. Sıcaklığa ek olarak kür süresinin de geopolimer betonun dayanımı üzerinde etkisi yüksek olmaktadır (Hadi vd., 2019).

Bing-Hui vd., (2014) yaptığı çalışmada, genellikle 20 °C ve 100 °C arasındaki sıcaklıklar, birkaç saatle birkaç gün arasında değişen sürelerde yapılan ısı kürünün geopolimerizasyon üzerinde olumlu etkileri olduğu belirtilmiştir. Kür sıcaklığının artmasıyla birlikte basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Bununla beraber, belli bir sıcaklığın üzerinde uygulanmakta olan ısı kürünün geopolimer betonun dayanımına olumlu bir katkısının olmadığı görülmüştür.

Rovnaník'in (2010) çalışmasına göre, ısı kürü geopolimerin iç yapısında meydana gelen kimyasal reaksiyonu önemli ölçüde iyileştirmektedir. Hem kürlenme süresi hem de ısı, geopolimer betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir. Isı kürü, kuru veya buharla iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Önceki araştırmalara göre, kuru ısı kürü yapılmış geopolimer beton numunelerine ait basınç dayanımının buharlı ısı kürü yapılmış geopolimer beton numunelerine nazaran yaklaşık %15 daha fazla artış sağladığı görülmüştür. 90 °C'ye kadar olan ısı küründe, sıcaklık artışının geopolimer beton numunelerinde basınç dayanımını artırdığı görülmüştür.

Altındal (2020) yaptığı çalışmada, farklı oranlardaki bağlayıcı malzeme kombinasyonları ile geopolimer beton numuneleri dökümüştür. %100 yüksek fırın cürufu, %75 yüksek fırın cürufu +%25 F-tipi uçucu kül içeren, %50 yüksek fırın cürufu +%50 F-tipi uçucu kül içeren 3 farklı geopolimer beton numunesinin yapılarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kür yöntemleri olarak laboratuvar, ısı kürü ve su kürü yöntemleri kullanılmıştır. 13 farklı kür yöntemi seçilmiş ve seçilen kür koşulları altında geopolimer beton numunelerinin 2., 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi incelenmiştir. En yüksek basınç dayanımı %100 yüksek fırın cürufu numuneler sağlamış, bu numuneler içinde en yüksek iki dayanım değerini ise 90 gün su kürü ve 2 gün ısı küründen sonra 88 gün laboratuvarında bekletilen numunelerin sağladığı görülmüştür. Kür koşullarına bakıldığında ise en yüksek dayanım değerlerinin bütün numuneler için 90 günlük su kürü ile sağlandığı görülmüştür. Bütün numunelerin 90. günde 90W (90 günlük su kürü) ortamında maksimum dayanım göstermesinin sebebi olarak numunelerin su içerisinde olmasından dolayı büzülmeye uğramaması ve mikro çatlakların olmaması, yüksek fırın cürufunun yüksek CaO içermesinden ötürü su

ortamında dayanımın daha yüksek olması olarak açıklanmıştır. Dolayısı ile Ca içeriği az olan geopolimerlerde bu kür koşulların ideal ortam olmadığı görülmüştür.

2.1.3. Alkali hidroksitin molaritesi (konsantrasyonu)

Geopolimer betonun dayanımına etkileyen parametrelerden biriside alkali hidroksitin konsantrasyonudur. Geopolimerizasyonun gerçekleşebilmesi için alimüna silikat kaynağı öncüle ek olarak bir alkali çözeltisine ihtiyaç duyulmaktadır. Geopolimerizasyonun gerçekleşmesi için genellikle olarak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikattır (K_2SiO_3) kullanılmaktadır (Ghafoor vd., 2021). Çoğu çalışma, alkali aktivatör çözeltisinde alkali silikat varlığının gerekli olduğunu, daha iyi mikro yapı ve mukavemet özellikleri sağladığını belirtmişlerdir. Reaksiyon sürecinde, öncülün daha iyi çözünmesi ve daha yüksek reaksiyon hızlarını elde etmek için alkali silikatlar hidroksitlerle birlikte kullanılmaktadır (Samarakoon vd., 2019).

Alkali hidroksitin molaritesi, geopolimerizasyon için en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Molaritenin artması ile öncülün çözünürlüğü artmaktadır. Daha yüksek sodyum hidroksit molaritesi daha yüksek basınç dayanımı sağlamaktadır (Khale ve Chaudhary, 2007). İdeal miktardaki alkali konsantrasyonu geopolimerin dayanımını artırmaktadır. Ayrıca, alkali aktivatörün konsantrasyonunda artış olması aktive edici çözeltinin pH'ında bir artışa neden olmaktadır. Farklı araştırmacılar alüminosilikatların doğru bir şekilde çözülmesi için 13 ile 14 arasındaki pH değerlerinde çalışmayı önermişlerdir. Daha yüksek pH değerinin geopolimer betonda daha yüksek basınç dayanımı sergilediği önceki çalışmalarla desteklenmiştir (Oyebisi vd. 2018). Öte yandan, daha küçük tane boyutlarına sahip çimento harçlarından daha büyük tane boyutlarına sahip olan harçlara göre daha yüksek pH değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Benzer şekilde, daha büyük partikül boyutuna sahip bir öncülde yüzey alanının az olması nedeniyle aktive edici çözelti ile daha az reaksiyona girme eğilimi göstermektedir (Castillo ve diğ., 2021). Alkali konsantrasyonu daha yüksek olan geopolimer harç numunelerinin, daha düşük alkali konsantrasyonu ile üretilenlere göre aşındırıcı etki gösteren kimyasalların saldırılarına karşı daha iyi performans gösterdiği de gözlemlenmiştir (Thokchom vd., 2010).

Ghafoor vd., (2021) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatörlerin oda sıcaklığında kürlenmiş geopolimer beton numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için çalışma yürütmüşlerdir. Uçucu kül kullanılarak değişen sodyum hidroksit konsantrasyonları (10M-16M), sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları (1.5, 2 ve 2.5) ve alkali aktivatör/uçucu kül oranları (0.4, 0.5 ve 0.6) baz alınarak farklı kombinasyonlarda toplam 45 geopolimer beton numunesi üretilmiştir. Test sonuçlarına göre daha yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonunda geopolimer beton numunelerinin yapışkan hale geldiğini ve gerekli işlenebilirliği elde etmek için daha fazla miktarda alkali aktivatör solüsyonu gerektiği görülmüştür. Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 14M değerine kadar, eğilme dayanımı ise 16M değerine kadar artış göstermiştir.

Ganesh ve Muthukannan (2019) yaptıkları çalışmada, 8M, 10M, 13M ve 16M değerleri için uçucu kül esaslı geopolimer betonlar dökülmüş, ayrı ayrı ortam ve ısı koşullarında kürlenmiştir. Bu numuneler bir saat boyunca 800°C sıcaklığa maruz bırakılmasının ardından oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış daha sonra basınç dayanımı ve kopma mukavemeti gibi mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Testler normal ve hızlı soğutma koşullarında yapılmış, betonun işlenebilirliği sıkıştırma faktörü testi kullanılarak belirlenmiştir. Geopolimer betonun 13M'de daha iyi kalan basınç dayanımına sahip olduğu ve işlenebilirliğin molarite değerindeki artışla azaldığı tespit edilmiştir.

Hake vd., (2016) yaptıkları çalışmada, geopolimerizasyon için alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit seçilmiştir. Farklı karışımlar hazırlamak amacıyla farklı molarite değerlerinde sodyum hidroksit çözeltisi (1M ile 16M) kullanılmıştır. 150x150x150mm'lik geopolimer beton numunelerine ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Genel olarak molarite değeri arttıkça basınç dayanımı artmış ve en yüksek basınç dayanımı 16M sodyum hidroksit konsantrasyonunda elde edilmiştir. Ayrıca molarite değerinin geopolimer beton numunelerinin dayanım kazanma hızına etki ettiği görülmüş, molarite arttıkça geopolimer beton numunelerinin dayanım kazanma hızının arttığı tespit edilmiştir.

2.1.4. Alkali hidroksit – Alkali silikat oranı

Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3), geopolimer beton karışımlarındaki aktivatör çözeltisinin hazırlanmasında en yaygın kullanılan alkali aktivatörlerin başında gelmektedir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatör çözeltisinde birlikte kullanıldığında geopolimer betonun mekanik performansını olumlu yönde etkilemektedir. Geopolimer betonda kullanılan alkali aktivatörler betonun basınç dayanımının yanı sıra kimyasal dayanımını ve fiziksel etkilere karşı davranışını, dolayısı ile betonun durabilitesini de etkilemektedir. Bu sebeple geopolimer betonda kullanılan alkali aktivatörlerin oranının iyi seçilmesi gerekmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalara bakıldığında sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının geopolimer betonun erken basınç dayanımını ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiği raporlanmıştır. Sonuç olarak sodyum silikat/sodyum hidroksit oranındaki değişim geopolimer betonun basınç dayanımını doğrudan etkilemektedir (Hardjito ve diğ., 2004).

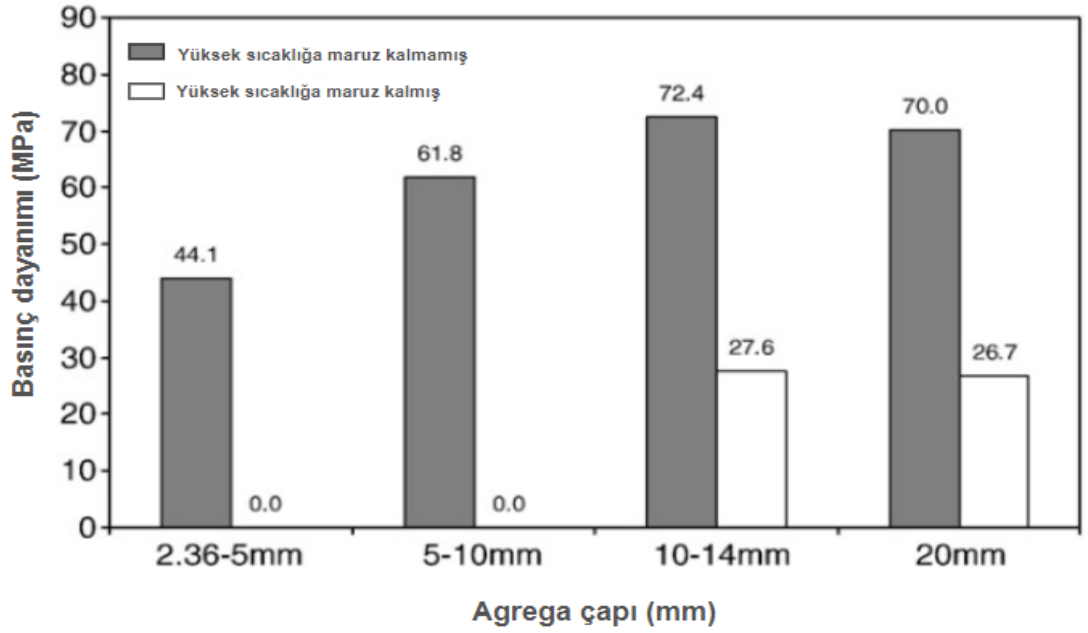
Niş (2019) yaptığı çalışmada, %50 F-tipi uçucu kül ile %50 yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numunelerin basınç dayanımının değişimini farklı molarite ve farklı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlarının değişimi ile beraber incelemişlerdir. Kullanılan alkali aktivatör çözeltisinde kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları için 1, 1.5, 2, ve 2.5 değerleri seçilmiştir. Sodyum hidroksit molaritesi 6M, 10M ve 14M olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca gecikmiş ısı kürünün geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, alkali hidroksitin molaritesi ve sonradan uygulanan ısı kürü geopolimer betonun basınç dayanımı sonuçlarını etkilemiştir. Geopolimer beton numunelerindeki en yüksek ve en düşük basınç dayanımı sırası ile 14 M ve 6 M molarite değerlerine sahip numunelerden elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük ortalama basınç dayanımı değerlerini ise sırasıyla sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2 ve 2.5 olan numuneleri sağlamıştır. Araştırmacılar yüksek alkali oranının geopolimer beton numunelerinin mekanik dayanımı üzerine olumsuz etkileri olabileceğini belirtmiştir. Gecikmiş ısı küründen en çok etkilenen numune %122'lik basınç dayanımı değişimi ile sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5 olan geopolimer beton numuneler olmuş, en az etkilenen numune ise

%43'lük basınç dayanımı değişimi ile sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olan geopolimer beton numuneler olmuştur.

Karaaslan ve Yener (2021) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatördeki sodyum hidroksit konsantrasyonu ve sodyum silikat içeriğinin uçucu kül ve pomza esaslı geopolimer hamurların mekanik özelliklerine ve ıslatma-kurutma direncine etkisini incelemişlerdir. Sodyum hidroksit konsantrasyonu için 8 M, 10 M, 12 M ve 14 M değerleri ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı için ise 0, 1, 2 ve 3 değerleri seçilerek geopolimer beton numuneleri üretmişlerdir. Elde edilen tüm numunelere ait basınç dayanımı silikat/sodyum hidroksit oranı artarken artış göstermiş, silikat/sodyum hidroksit oranı 2'den 3'e çıkarken basınç dayanımında hafif bir azalma olmuştur. En iyi basınç dayanımı ise molarite değeri 8 M ve silikat/sodyum hidroksit oranı 2 olan numuneden elde edilmiştir. Uçucu kül ve pomza esaslı geopolimerlerde, su etkilerine karşı dayanımın sağlanmasında alkali aktivatör çözeltisinde sodyum silikatın kullanılmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir.

2.1.5. Agregat etkisi

Kong vd., (2010) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer kompozitlerinin davranışını incelemiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde agrega ve geopolimer farklı termal genleşme davranışları göstermiş ve sonuç olarak geopolimere agrega eklenmesiyle yangın dayanımının düştüğü görülmüştür. Yapılan farklı dilatometri testleri sonucu agregaların yüksek sıcaklık ile genleştiği, geopolimer macunda ise büzülme olduğu görülmüştür. 10 mm'den küçük agregalar kullanılarak dökülen uçucu kül esaslı geopolimer harç ve geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz kalmasından sonra neredeyse hiç dayanım göstermediği görülmüştür (Şekil 2.2). Bazalt bazlı karışık boyutlarda agrega kullanılan geopolimer beton numuneleri cüruf bazlı karışık boyutlarda agrega içeren geopolimer beton numunelerinden daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca karışık boyutlarda agrega kullanılan geopolimer beton numunelerinin 10-14 mm ve 14-20 mm boyutlarındaki agrega içeren geopolimer beton numunelerine göre daha iyi performans sağladığı görülmüştür.



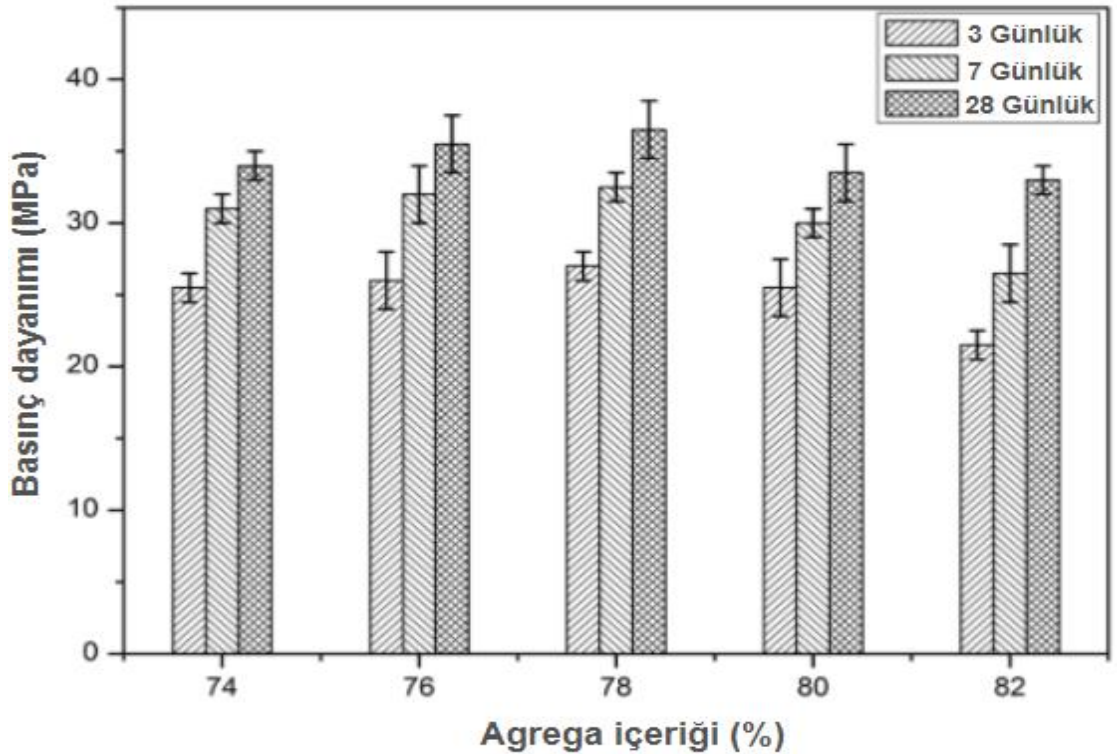
Şekil 2.2 Agreg a boyutunun geopolimer betonun yangın dayanımına etkisi (Kong and Sanjayan, 2010)

Agreg a boyutu geopolimer betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışına önemli ölçüde etki etmektedir. Geopolimer beton karışımındaki maksimum agreg a boyutu arttıkça yüksek sıcaklık etkisinde daha az dökölme olmaktadır. Agreg a boyutunun artmasıyla çatlak uçları korunmakta ve bu nedenle kırılma çatlaklarının boyutu azalmaktadır. Geopolimer beton karışımındaki maksimum agreg a boyutu artışıyla stabilite artmakta ve yangına karşı daha yüksek direnç sağlanmaktadır (Pan vd., 2012).

Rickard vd., (2016) yaptığı çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer betonda kuvars agreg a kullanımının genişletilmiş kil agreg ası kullanımına kıyasla yüksek sıcaklık altında daha büyük dayanım kayıplarına yol açtığı görülmüştür. Kuvarsın sıcaklık etkisinde büyük termal genleşmeler göstermesi bu etkinin nedeni olarak gösterilmiştir. Ayrıca kuvars agreg a kullanılan geopolimer beton numunelerinin daha düşük geçirgenlik özelliği göstermesi nedeniyle 300°C'nin altındaki sıcaklıklarda daha şiddetli dehidrasyondan kaynaklı çatlama ve mukavemet kayıpları yaşadığı gözlemlenmiştir. 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise kaynaşmadan dolayı mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada geopolimer bileşenlerini dehidrasyon hasarına daha az eğilimli olacak şekilde optimize ederek veya alkali katyon tipini değiştirerek performans iyileştirmelerinin gerçekleştirilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Abdulkareem vd., (2014) yaptığı çalışmada, genleştirilmiş hafif kil agregalarının geopolimer hamuruna eklenmesinin yüksek sıcaklıklar etkisindeki mekanik ve mikro yapısal özellikleri önemli ölçüde geliştirdiğini bulmuşlardır. Buna ek olarak çalışmada, geopolimer beton numunelerinde hafif agregaların kullanılması nedeniyle düşük basınç dayanımları elde edilmiştir.

Chithambaram vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada, toplam agregası içeriğinin çeşitli molarite değerlerinde ve kürleme sıcaklıklarında uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Agregası hacimlerinin toplam hacme oranı olarak %74 ile %82 arasında değişen beş farklı değer seçilmiş ve test edilmiştir. Geopolimer betonun basınç dayanımının agregası içeriğinin %78'e kadar artmasıyla arttığı ve ardından agregaları bir arada tutacak olan bağlayıcı malzeme oranının azalmasıyla düştüğü keşfedilmiştir (Şekil 2.3). 60°C kür koşullarında %78 toplam agregası içeriğine sahip geopolimer beton numunesi için en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşılsa da %76 oranlı agregası içeriğine sahip geopolimer beton karışımına kıyasla işlenebilirlikte %37.5'lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 2.3 Agregası içeriğinin 3, 7 ve 28 günlük uçucu kül esaslı geopolimer numunelerinin basınç dayanımına etkisi (Chithambaram vd., 2018)

2.1.6. Suyun etkisi

Geopolimer beton karışımlarındaki su içeriği, dikkate alınması gereken önemli parametrelerden bir diğeri olmaktadır. Çünkü su içeriği artırılarak işlenebilirlik artırılabilen fakat sıradan Portland çimentolu betonlarda da olduğu gibi su/bağlayıcı oranı artacağından dayanım kaybı olmaktadır. Su kullanımının alkali aktivatörlerde molarite değerini düşürmesi durumundan dolayı suyun fazla kullanımı geopolimer betonlarda dayanımda düşüşe yol açmaktadır (Thang, 2016).

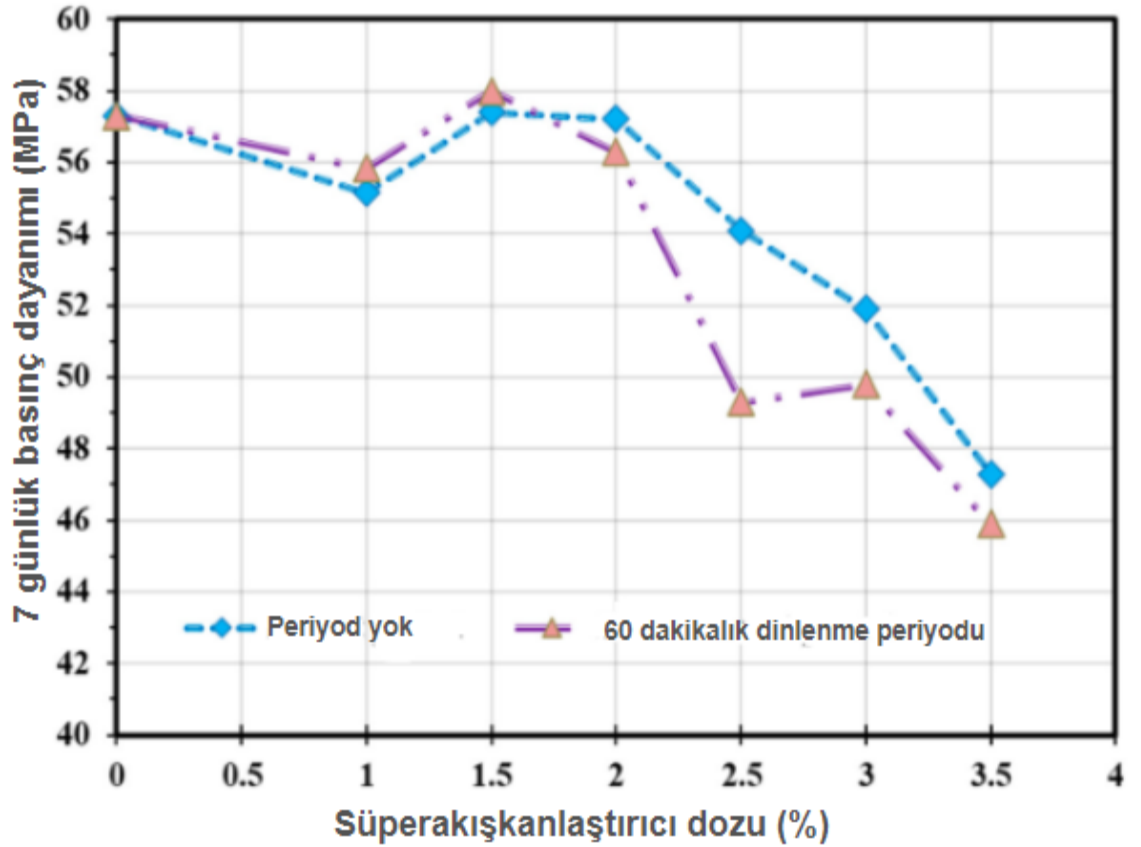
Rachmansyah vd., (2019) su ilavesinin geopolimer beton üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada, bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılmış ve farklı derişimlerde (8M, 12M ve 16M) sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1 alınan numunelere m³ başına 15, 17.5, 20, 22.5 ve 25 litre su ilavesi yapılmıştır. Geopolimer beton imalatında ilave su miktarının artmasıyla çökme değerinin artacağı belirtilmiştir. Geopolimer beton üretiminde belirli bir miktarda ilave su kullanımı ile çökme artmış, fakat belli bir noktadan sonra basınç dayanımında azalmaya neden olacağı sonucuna varılmıştır.

2.1.7. Süperakışkanlaştırıcı katkı etkisi

Su/bağlayıcı oranı betonun performansını etkilemektedir. Belirli bir aralık içinde betonun su/bağlayıcı oranı ne kadar küçükse, betonun sonraki performansı o kadar iyi olmaktadır. Yaygın olarak süperakışkanlaştırıcılar (SP) olarak bilinen yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri, su içeriğini azaltmak ve aynı zamanda betonun daha yüksek mukavemet ve dayanıklılığı ile sonuçlanan sabit bir düzeydeki işlenebilirliği korumak için kullanılmaktadır. Alternatif olarak SP'ler, basınç dayanımında herhangi bir değişiklik olmaksızın betonun daha iyi akmasını sağlayan sabit bir su içeriğini koruyarak betonu plastikleştirmek veya akışkanlaştırmak için kullanılabilmektedir (Nematollahi and Sanjayan, 2014).

Triwulan vd., (2016) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda SP katkısının uçucu kül esaslı geopolimer betonun dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SP katkısının geopolimer betonun sertleşme süresini çok az etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. En iyi basınç ve çekme dayanımı değerleri bağlayıcı kütleline oranla %1,5 SP katkılı numunelerden elde edilmiştir.

Hardjito vd., (2004) yaptıkları çalışmada SP dozajının uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için bir deney yapmışlardır. Çeşitli oranlarda su azaltıcı katkıları kullanmışlardır. Bulgular, bir yandan süperakışkanlaştırıcı katkısının geopolimer betonun işlenebilirliğini iyileştirdiğini, diğer yandan kütlece yaklaşık %2'ye kadar süperakışkanlaştırıcı eklenmesinin uçucu kül esaslı geopolimer betonun üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu ve %2 lik katkı değerinden sonra basınç dayanımının düştüğünü göstermiştir (Şekil 2.4). Ayrıca, bu araştırma çalışmasının bulgularına göre, çeşitli kürleme sıcaklıklarında geopolimer beton karışımına fazla su eklenmesiyle basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.4 Süperakışkanlaştırıcı katkısının geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi (Hardjito vd., 2004)

2.2. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Geopolimer Beton ve Portland Çimentolu Betonların Davranışı

Diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında betonun dayanımı daha yüksek olmakta, istenilen boyutlarda ve şekillerde üretilebilmektedir. Ayrıca betonun yüksek sıcaklıklara ve yangına dayanıklı olma özelliği vardır. Beton yüksek sıcaklıklar etkisinde belli bir süre zarar görmemekte ve zehirli duman çıkarmamaktadır. Fakat bu özelliği belli bir sıcaklığa kadar ve sınırlı süre için geçerli olmaktadır (Ay, 2010). Betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışı çimento hamuru ve agrega özelliklerine bağlı değişiklik göstermektedir. Çimento hamuru jel yapıdadır ve bu jel yapıyı oluşturan C-S-H yapıları absorpsiyon suyu ile birbirlerine bağlıdır. Jel yapısı içindeki absorbe su ve C-S-H'ların yapısındaki hidrat suları kolaylıkla buharlaşmamaktadır. Çimento türünün yanı sıra üretim esnasındaki su/çimento oranına bağlı olarak betonun yapısındaki serbest su miktarı %4'e varan değerler almaktadır. Portland çimentosunun normal çalışma koşulları altında uygun termal özelliklere sahip olmasına rağmen şiddetli termal yükleme meydana geldiğinde mikro yapısında bulunan su nedeniyle sıklıkla hasara uğramaktadır. Su 100°C'de kaynadığı için, yüksek sıcaklıklar suyun buharlaşmasına ve genişlemesine neden olmaktadır. Su buharının genişmesi, kılcal çatlak ve boşluklarda basıncın yükselmesine neden olmakta bu da içten dışa doğru uygulanan, genellikle çatlama ve parçalanmaya neden olan bir iç kuvvet oluşmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak betonda, özellikle yüksek sıcaklıklarda kütle kaybı meydana gelmekte ve hasar oluşmaktadır. C-S-H, CH ve diğer hidrasyon ürünlerinin yapısındaki su yüksek sıcaklıklarda kaybolmaktadır. Kimyasal bağları kırmak için ek enerji gerektiğinden 100°C'yi aşan sıcaklıklarda bu olay gerçekleşmekte ve dolayısıyla hidrasyon ürünlerinin dehidrasyonuna, akabinde ise malzemenin tamamen bozulmasına neden olmaktadır (Uysal, 2004). Sıcaklık 200°C'ye ulaştığında daha fazla kütle kaybı olmaktadır. Karışımında kullanılan farklı bileşenlere bağlı olarak beton ya dayanım kazanmaya ya da dayanım kaybetmeye başlamaktadır. Su içeriği, çimento türü ve betonun yaşı buharlaşabilen ve kimyasal olarak bağlı olan su miktarını etkilemektedir. Sıcaklık 450°C ile 550°C arasına ulaştığında portlandit ayrışmaktadır. Bu süreç betonda daha fazla kütle kaybına neden olur. Isı daha da arttığında, 573°C'de kuvars inversiyonu gerçekleşir ve buda betonun önemli ölçüde bozulmasına yol açan %5 ila %7'lik bir hacim artışına neden olmaktadır. 600°C ile 1200°C arasında betonun yük taşıma kapasitesi oldukça düşüktür (Alhamad vd., 2022).

Bir malzemenin yüksek sıcaklık altındaki performansı, özellikle bu malzeme yapılarda yangına karşı dayanım ve ısı yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılacaksa önem kazanmaktadır. Geopolimer malzemeler doğal olarak yangın dayanımı göstermektedir. İnorganik bir malzeme olduğu için organik polimerler gibi yanmamaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde duman ve zehirli gaz salınımı yapmamaktadır. Geleneksel seramik kompozitlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda üretilabilmektedir (Davidovits, 1991).

Geopolimerleri yangına dayanıklı bir yapı malzemesi olarak kullanabilmek için geopolimerin termal performansının mikro, orta ve makro ölçekte incelenmesi gerekmektedir. Mikro ölçek, yüksek sıcaklık altında geopolimerin yapısında faz ve mikro yapısal dönüşümlerin gerçekleşmesi demektir. Yani mikro ölçek daha çok geopolimerin kimyasal dayanımı ile ilgili olmakta, dolayısı ile bu ölçek malzemenin orta ve makro ölçekteki dayanımlarına etki etmektedir. Malzemenin yüksek sıcaklıklar altında hacimsel deformasyonlara ve termal çatlaklara direnme yeteneği de orta ölçekli dayanım olarak adlandırılmaktadır. Makro ölçekli kararlılık ise bir malzemenin yüksek sıcaklığa maruz kaldığında mukavemet kaybına karşı dayanım ve parçalanma direncine sahip olma yeteneğini göstermektedir (Lahoti vd., 2018).

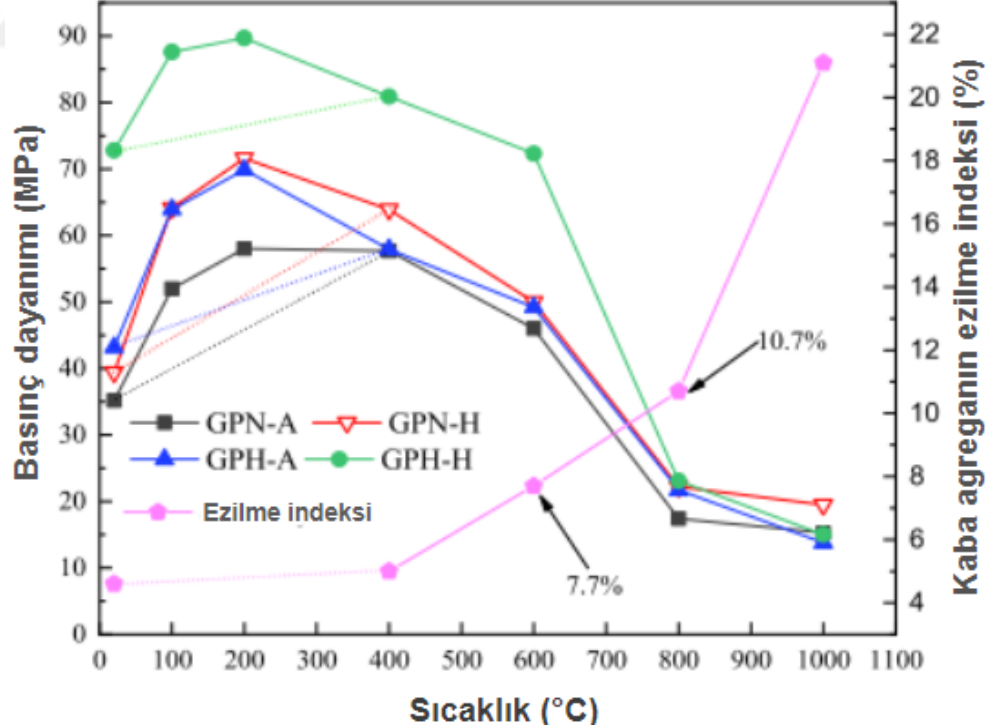
Öte yandan, yüksek sıcaklık etkisinde Portland çimentolu beton ve geopolimer betona ait performanslar arasındaki farkı anlamak önem arz etmektedir. Hem Portland çimentolu beton hem de geopolimer betonun yanmaz olduğu görülmektedir. Ancak geopolimer betonun ısı iletkenliği Portland çimentolu betondan daha düşük olabilmektedir. Geopolimer beton, Portland çimentolu betona kıyasla daha iyi dökülme direnci göstermektedir. Bu, geopolimerlerdeki birbirine bağlı gözenek yapısına ve suyun geopolimerlerdeki kimyasal yapının bir parçası olmaması bulgusuna atfedilmektedir. Portland çimentolu betonda yüksek sıcaklıklar etkisinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CH) gibi hidratasyon ürünlerinin kimyasal yapısı ciddi şekilde etkilenirken, geopolimerlerin kimyasal yapısı dehidrasyon reaksiyonlarından çok az etkilenmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimerlerdeki mukavemet kaybı, bağlayıcı ve agreganın dikkatli bir şekilde seçilmesi ile önlenabilmektedir (Nazari vd., 2019).

2.2.1. Dayanım kaybının incelenmesi

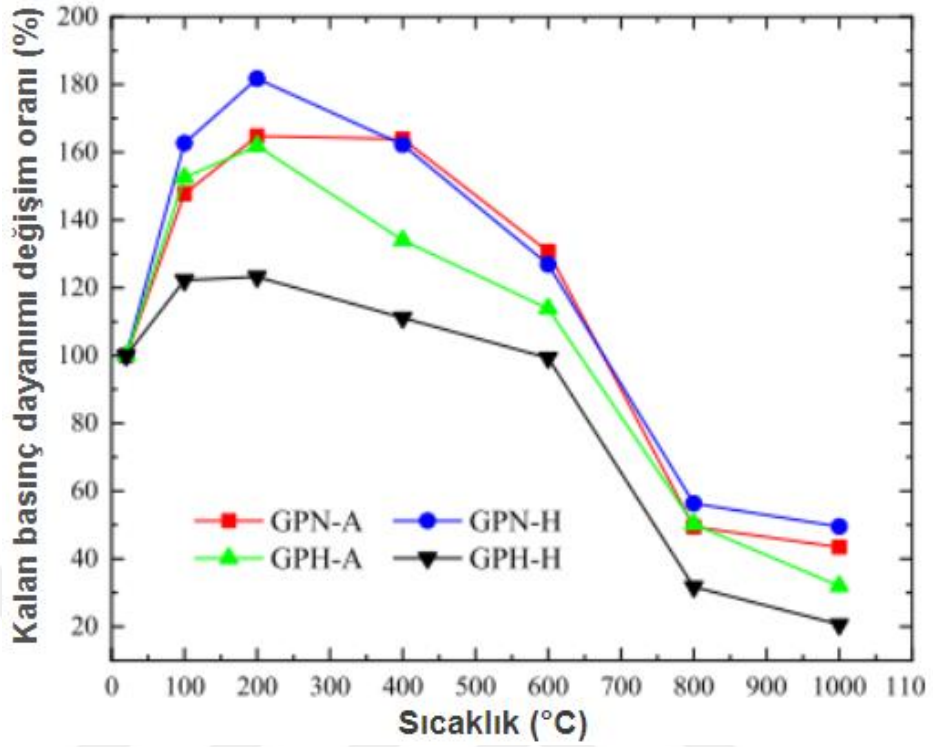
Bir malzemenin kalan basınç dayanımı, bir yükleme uygulaması altında hasarlı malzemenin dayanabileceği maksimum basınç gerilimi olarak adlandırılmaktadır. Geopolimer betonun çatlak ilerlemesine karşı direnci, kalan basınç dayanımını etkilemektedir. Geopolimer betonun kırılma tokluğu ve kalan basınç dayanımı, çok yüksek bir sıcaklığa maruz kaldığında azalma eğilimi göstermektedir. Yüksek sıcaklık yani ısıya maruz kalma, yüzey özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerin başında gelmektedir (Ishak vd., 2019). Bu nedenle kalan basınç dayanımı, geopolimer betonun önemli bir dayanıklılık özelliğidir. Literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarına bakıldığında, yüksek sıcaklık etkisinde kalan geopolimer betonun numunelerinin kalan basınç dayanımının uçucu kül, nano-silika ve mikro-silika gibi katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilebileceği sonucu çıkarılabilmektedir (Kantarci vd., 2021). Kauçuk bazlı lif katkısı geopolimer betonun kalan basınç dayanımına etki etmektedir. Kauçuk bazlı lif katkısının ilk yüklemede beton çatlaklarına neden olmasından dolayı, yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer betonun basınç dayanımını azaltmıştır. Bunun nedeni olarak ise kauçuk lifin havayı tutma ve gözenek oluşturma özellikleri gösterilmiştir (Luhar vd., 2018). Ayrıca kullanılan alkali aktivatör çözeltisi özelliklerinin de basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür (Hosan vd., 2016).

Zhang vd., (2020) yaptıkları çalışmada, iki saat boyunca 20 °C ila 1000 °C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan uçucu kül esaslı dört çeşit geopolimer beton gurubunun kalan basınç dayanımlarını değerlendirmişlerdir. Laboratuvar ortamında kürlenmiş normal dayanımlı numunelere GPN-A, ısı kürü uygulanan normal dayanımlı numunelere GPN-H, laboratuvar ortamında kürlenmiş yüksek dayanımlı numunelere GPH-A ve ısı kürü uygulanmış yüksek dayanımlı numunelere ise GPH-H ismi verilmiştir. Laboratuvar ortamı ve ısı kürü sıcaklıkları sırasıyla 25 °C ve 80 °C'dir. Normal ve yüksek mukavemetli geopolimer beton için sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları sırasıyla 2.5 ve 3'tür. Şekil 2.5, yüksek sıcaklıklarda geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımını ve iri agregalarının ezilme indeksini göstermektedir. 20 °C ile 400 °C arasında, tüm geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerlerinin orijinal basınç dayanım değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür ve bu etkinin Şekil 2.5'te görüldüğü gibi 20 °C ile 400 °C sıcaklık aralığındaki iri agreganın düşük ezilme indeksi değerlerine atfedilmiştir. Bulgular

geopolimer beton numunelerindeki iri agreganın 400°C'ye kadar termal strese dayanma kabiliyetini göstermiştir. Beklendiği gibi, en yüksek basınç dayanımını 200 °C'de 89.9 MPa ile GPH-H numunesinden elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımının orijinal basınç dayanımına oranı, test edilen tüm geopolimer beton numuneleri arasında en düşük olan %123.2 değeri olarak ölçülmüştür (Şekil 2.6). Çalışma, tüm geopolimer beton numunelerinin dayanım kaybından önce dayanabileceği maksimum sıcaklığın 600 °C olduğunu göstermiştir. 600 °C'nin ötesinde geopolimer beton numunelerindeki iri agreganın termal bozunma göstermesinden dolayı çatlama ve kabarma yaşanmış, bu da basınç dayanımlarının daha da düşmesine neden olmuştur. GPH-A'nın kalan basınç dayanımı yüzdesinin, tüm sıcaklıklarda GPH-H'den daha yüksek olduğu görülmüştür. Laboratuvar ortamında kürlenen geopolimer beton numunelerinin ısı kürü uygulanmış geopolimer numunelerine göre daha iyi basınç dayanımı artışı ve daha düşük dayanım bozulması göstermiştir.



Şekil 2.5 Geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklık altında kaba agrega ezilme indeksi ve basınç dayanımı (H. Zhang vd., 2020)

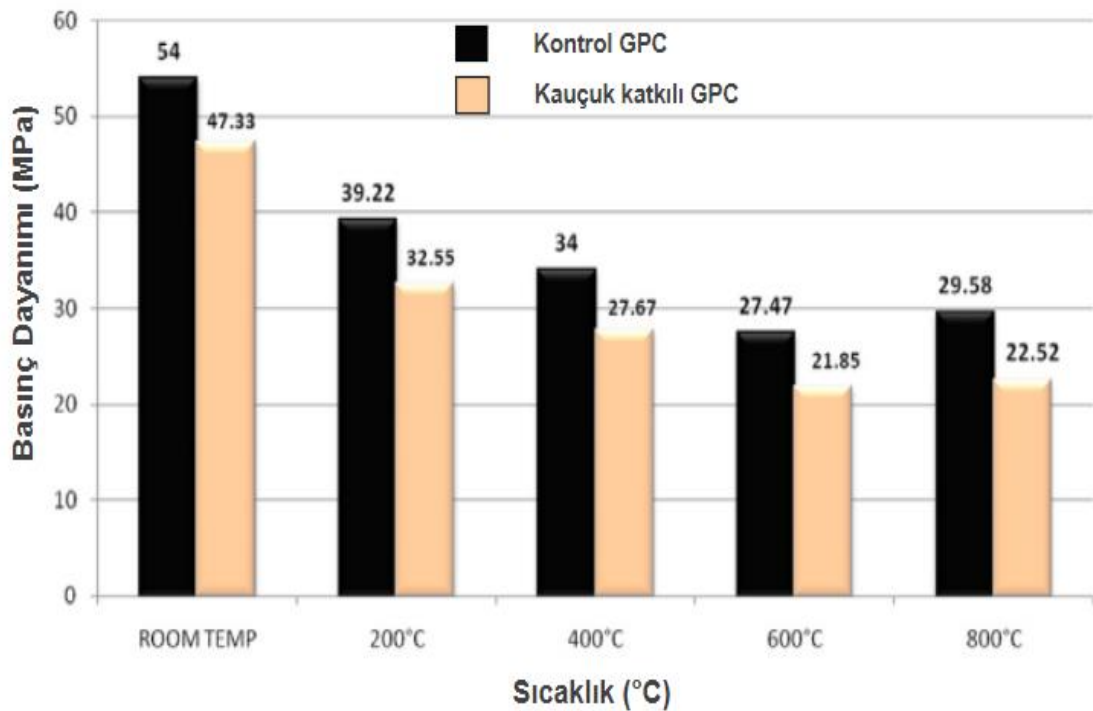


Şekil 2.6 Geopolimer beton numunelerinin kalan basınç dayanımının yüksek sıcaklık altında değişimi (H. Zhang vd., 2020)

Hosan vd., (2016) yaptıkları çalışmada sodyum ve potasyum bazlı aktivatörlerin, yüksek sıcaklıklara maruz kalan F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları ve fiziksel değişiklikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 28 günlük kür uygulamasından sonra kalan basınç dayanımlarını değerlendirmek için numuneler 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda test edilmiştir. Geopolimer beton numunelerinde kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit ve potasyum silikat/potasyum hidroksit oranları için 2, 2.5 ve 3 değerleri seçilmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 3 olan numunelerin kalan basınç dayanımları 600 °C'ye kadar artış göstermiştir. Potasyum bazlı alkali aktivatörlerle sentezlenen geopolimer beton numunelerinin sodyum bazlı alkali aktivatör kullanılan numunelere göre 600 °C sıcaklığa kadar daha iyi kalan basınç dayanımı değerleri sağlamıştır. Ayrıca potasyum bazlı aktivatörlerle sentezlenen numunelerin sodyum bazlı numunelere göre yüksek sıcaklıklar etkisinde daha iyi basınç dayanımları, daha düşük kütle kaybı, daha düşük hacimsel büzülme ve daha düşük çatlama hasarı değerleri göstermiştir.

Luhar vd., (2018) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı kontrol ve kauçuk katkısı yapılmış geopolimer beton numunelerinin (Kontrol GPC ve kauçuk katkılı GPC)

basınç dayanımını oda sıcaklığı, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda araştırmışlardır. Numuneler oda sıcaklığından itibaren dakikada 4.4 °C hızla hedef sıcaklıklara ısıtılmış ve iki saat boyunca bu sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Kauçuk katkı GPC numunesinin basınç dayanımlarındaki düşüşün Kontrol GPC numunesine göre daha az olduğu görülmüştür (Şekil 2.7). Sırasıyla 200 °C ve 800 °C sıcaklıklardaki dayanım kayıpları kauçuk katkı GPC numunesi için %31.23 ve %52.43 iken, kontrol GPC numunesi için sırasıyla %27.38 ve %45.22 olmuştur. Kauçuk katkı GPC numunesinin basınç dayanımının düşük olmasını iki nedene bağlamışlardır, ilki kauçuk lastik liflerinin yumuşak ve hafif olmasından dolayı çatlamalara daha yatkın olması ikinci neden ise kauçuk lastik lif yoğunluğunun ince agregaya göre daha düşük olmasına bağlanmıştır. Kauçuk lastik liflerinin kauçuk katkı GPC numunesindeki havayı tutma ve gözenekler oluşturma eğilimi, Kontrol GPC numunesine kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet düşüşlerine neden olduğu görülmüştür.



Şekil 2.7 Kontrol ve kauçuk katkıli geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımının sıcaklık altındaki değişimi (Luhar vd., 2018)

2.2.2. Kütle kaybının incelenmesi

Yüksek sıcaklıkların önemli etkilerinden biri kütle değişimidir ve bu değişim numunenin geometrisini önemli ölçüde etkilemektedir. Normal koşullardaki numunenin

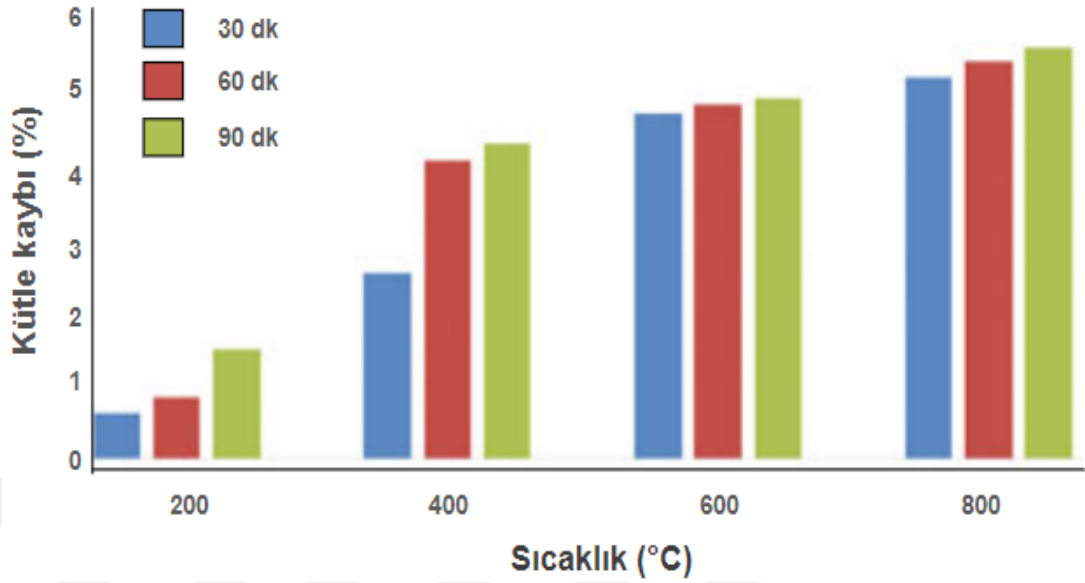
kütlesi tartılmakta, ısıya maruz kaldıktan sonra beton numunelerinin kütle kaybını ölçmek için kullanılmaktadır (Zhang vd., 2020). Sertleşmiş geopolimer malzemenin yapısında serbest olarak, fiziksel olarak ve kimyasal olarak bağlı olan üç farklı şekilde su bulunmaktadır. Sıcaklığın 100 °C'nin üstüne çıkmasıyla bu sular geopolimerin yapısından kaçmakta veya buharlaşarak buhar basıncı oluşturmaktadır. Kütle kayıplarının çoğu geopolimer hamurundaki serbest su kayıplardan dolayı olmakta ve genellikle bu kayıplar 400 °C ve altındaki sıcaklıklarda meydana gelmektedir (Li vd., 2018).

Öte yandan artan sıcaklıklar etkisinde geopolimer beton kompozitindeki malzemelerin farklı termal genleşme özellikleri göstermesi kütle kayıplarına yol açabilir. Bu yüzden kullanılan agreganın geopolimer betonun artan sıcaklıklar altında gösterdiği kütle kayıplarına doğrudan etkisi olabilir. Bu doğrultuda Khan ve Sarker (2020) yürüttükleri çalışmada kum yerine farklı oranlardaki atık camı ince agrega kaynağı olarak seçmiş, F sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harç karışımında kullanımı araştırmışlardır, 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra kum esaslı harcın hacmi önemli ölçüde artmış, bu da yüzeylerde boyuna ve enine çatlakların gelişmesine neden olmuştur.

Ayrıca geopolimer beton yüksek sıcaklık etkisinde Portland çimentolu betona göre daha az hacim değişikliği göstererek daha kararlı bir performans göstermiştir. Tarımsal endüstriyel atıklardan elde edilen harmanlanmış küllere sahip geopolimer beton, katı çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısı nedeniyle 200 °C ile 800 °C arası yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra Portland çimentolu betona göre daha fazla yapısal stabilite sergilemiştir (Hussin vd., 2015). Junaid vd; (2015) yürüttükleri çalışmada geopolimer betonun 600 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda malzeme değişikliklerine uğradığını ve uçucu kül parçacıklarının çökmeye ve homojen bir eriyik malzeme oluşturmak üzere kaynaşmaya başladığını ve bu sebeple Portland çimentolu betona kıyasla daha yüksek kararlılık sağladığını belirtmişlerdir. Zhang vd., (2020) yaptıkları çalışmada 700 °C'ye kadar yükselen sıcaklıkların geopolimer beton özellikleri üzerindeki etkisini X-ışınları ile analiz etmiş ve Portland çimentolu beton ile karşılaştırmışlardır. Geopolimer betonun Portland çimentolu betona kıyasla dökülmeye karşı daha fazla koruma sağladığı görülmüştür.

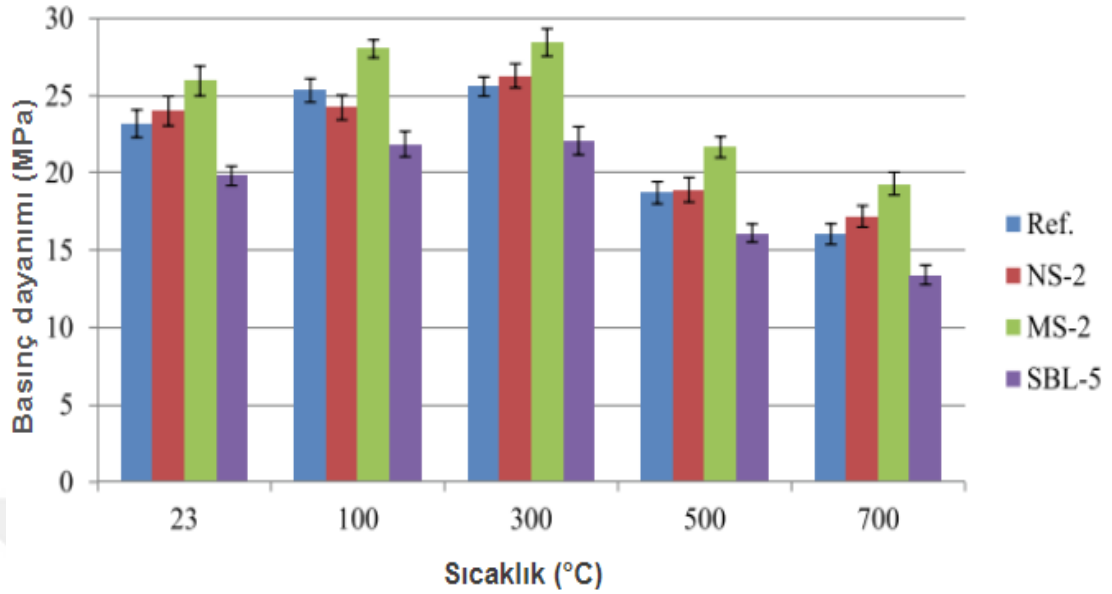
Razak vd., (2021) yaptığı çalışmada, gerçek bir yangın olayını simüle etmek amacıyla 28 gün kürlenmiş uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerine alev testi yapılmıştır. Beton numuneler iki saat boyunca 500 °C ve 1200 °C’de yangın alevine maruz bırakılmış, test edilmeden önce ortam sıcaklığına soğutulmuştur. Herhangi bir çatlama, kabarma ve renk değişikliği olup olmadığını gözlemlemek için numuneler üzerinde görsel inceleme yapılmıştır. Daha sonra kütle kayıpları ve kalan basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar, Portland çimentolu beton esaslı referans numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Portland çimentolu betonun aksine, 500 °C’de yangına maruz kaldığında geopolimer betonun mukavemetinin arttığı görülmüştür. Geopolimer betona ait yanmadan kaynaklanan nem kaybının daha az olması nedeniyle Portland çimentolu betona kıyasla daha az bir kütle kaybı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Portland çimentolu betona göre açıkta kalan yüzeyde daha az çatlama olduğu ve geopolimer betonda hiçbir kabarmanın meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Buda geopolimer betonun yapısal bütünlüğünün başarıyla korunduğunu göstermiştir.

Rao vd., (2019) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer numuneler üretilmiş, bu numuneler 30, 60 ve 90 dakika boyunca 200 °C ile 800 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler su ve oda koşullarında olmak üzere 2 farklı şekilde soğutulmuş ve test edilmiştir. Artan sıcaklıklar ile betonun kütle ve basınç dayanımının azaldığını, oda koşullarında soğutmanın suyla söndürmeye göre daha yüksek kalan basınç dayanımı değerleri ile sonuçlandığını göstermişlerdir. Daha yüksek ve daha uzun sürelerde sıcaklığa maruz kalmanın geopolimer beton numuneleri üzerinde daha fazla kütle ve dayanım kaybına neden olduğu görülmüştür (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Yüksek sıcaklık etkisinde kütle kayıpları (Mallikarjuna Rao vd., 2019)

Kantarci vd., (2021) yürüttükleri çalışmada nano silika (NS), mikro silika (MS) ve stiren-bütadien lateks (SBL) kullanarak volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklıklar altındaki performanslarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla geopolimer beton numunelerine bağlayıcı ağırlığına göre sırasıyla %2, %2 ve %5 oranlarında NS, MS ve SBL katkı maddeleri eklenmiştir. 12 M sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak aktive edilmiş volkanik tüf esaslı geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra bir saat süreyle yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı, su emme, görsel görünüm, ağırlık ve mikro yapısındaki değişiklikler araştırılmıştır. Tüm geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı katkı maddesinden bağımsız olarak 300 °C sıcaklığa kadar artmıştır (Şekil 2.9). 300 °C sıcaklıkta %2 MS katkılı geopolimer beton numunesi, incelenen diğer tüm geopolimer beton numunelerine kıyasla 28.45 MPa ile en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır. Aynı sıcaklıkta %2 NS katkılı, katkısız ve %5 SBL katkılı geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı sırasıyla 26.30 MPa, 25.60 MPa ve 22.09 MPa olarak test edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerine eklenen katkı maddesi tipinin, yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanan polikondenzasyon reaktivitesini arttırmada önemli bir rol oynadığını kanıtlamışlardır.



Şekil 2.9 Geopolimer beton numunelerinin farklı sıcaklıklar altındaki basınç dayanımı (Kantarci vd., 2021)

2.2.3. Lif katkısının yangın dayanımına etkisi

Betonun bazı mekanik özelliklerini, özellikle betonun çekme dayanımı kabiliyetini iyileştirmek için lif katkısı yapılmaktadır. Betonun darbe yüklerine karşı daha dayanıklı hale getirmek amacıyla bu uygulama yapılmaktadır. Bunlara ek olarak hasarı ve genel olarak çatlakları azalttığı için lif katkısı betonun ömrünü uzatmak için kullanılmaktadır. Ancak araştırmacılar, genel olarak betonun ve özellikle yüksek sıcaklıkların etkisi altında lif katkısı içeren geopolimer betonun davranışını incelemiştir. Fiber katkısı mikro yapıyı iyileştirerek ve geopolimer hamurunun yoğunluğunu artırarak geopolimer betonda su emilimini azaltmaktadır. Bu sonuçların fiber kalitesi ile nedensel bir ilişkisi olduğu ve fiber çeşidinden etkilenmediği görülmüştür (Moradikhou vd., 2020).

Zhang vd., (2014) yaptıkları çalışmada farklı sıcaklıklar altında farklı kısa karbon fiber içeriklerinin geopolimer beton dayanımları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar, %50 uçucu kül ve %50 metakaolin içeren %2 karbon fiber takviyeli geopolimerin 500 °C de daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tanyildizi ve Yonar (2016) yaptıkları çalışmada PVA (polivinil alkol) fiber katkılı geopolimer betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığı incelenmiştir.

Üretiminde F sınıfı uçucu kül kullanılan numunelere %0, %1 ve %2 oranlarında PVA fiber katkısı kullanılmıştır. %1 ve %2 PVA lif içeriğine sahip numunelerin basınç dayanımı, kontrol (lif içeriği olmadan) numunesinden sırasıyla %30 ve %90 daha yüksek değerler vermiştir. 600 °C ve 800 °C de yüksek sıcaklık etkisinden sonra kalan basınç dayanımı, %2 PVA lif içeriğine sahip numune için sırasıyla %63 ve %51 olmuştur.

Çelik vd., (2018) yaptıkları çalışmada, metakaolin esaslı geopolimer betonda dört çeşit lif katkısını araştırmıştır. PVA ve bazalt lif takviyeli numunelerin, poliamid ve poliolefin numunelerine göre 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında daha az dayanım kaybı olduğu görülmüştür. Artan fiber katkısı içeriği artışının hem numuneye ait boy değişimine hem de kütle kayıplarına olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir.

Shaikh ve Haque (2018) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer beton numuneleri üretilmiş, ağırlıkça %0.5, %1 ve %1.5 oranında bazalt ve karbon fiberler katkıları eklenmiştir. Buna ek olarak fiber katkısı içermeyen kontrol numunesi de dökülmüştür. Her numune oda sıcaklığı, 200 °C, 400° C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve test edilmiştir. Yüksek sıcaklık altında en iyi sonuçları, ağırlıkça %1 bazalt ve karbon fiber katkılı numuneler vermiştir. Karbon fiber katkısının bazalt fiber katkısından daha iyi sonuç verildiği görülmüştür.

2.3. Geopolimer Betonun Yangın Dayanımının Modellenmesi

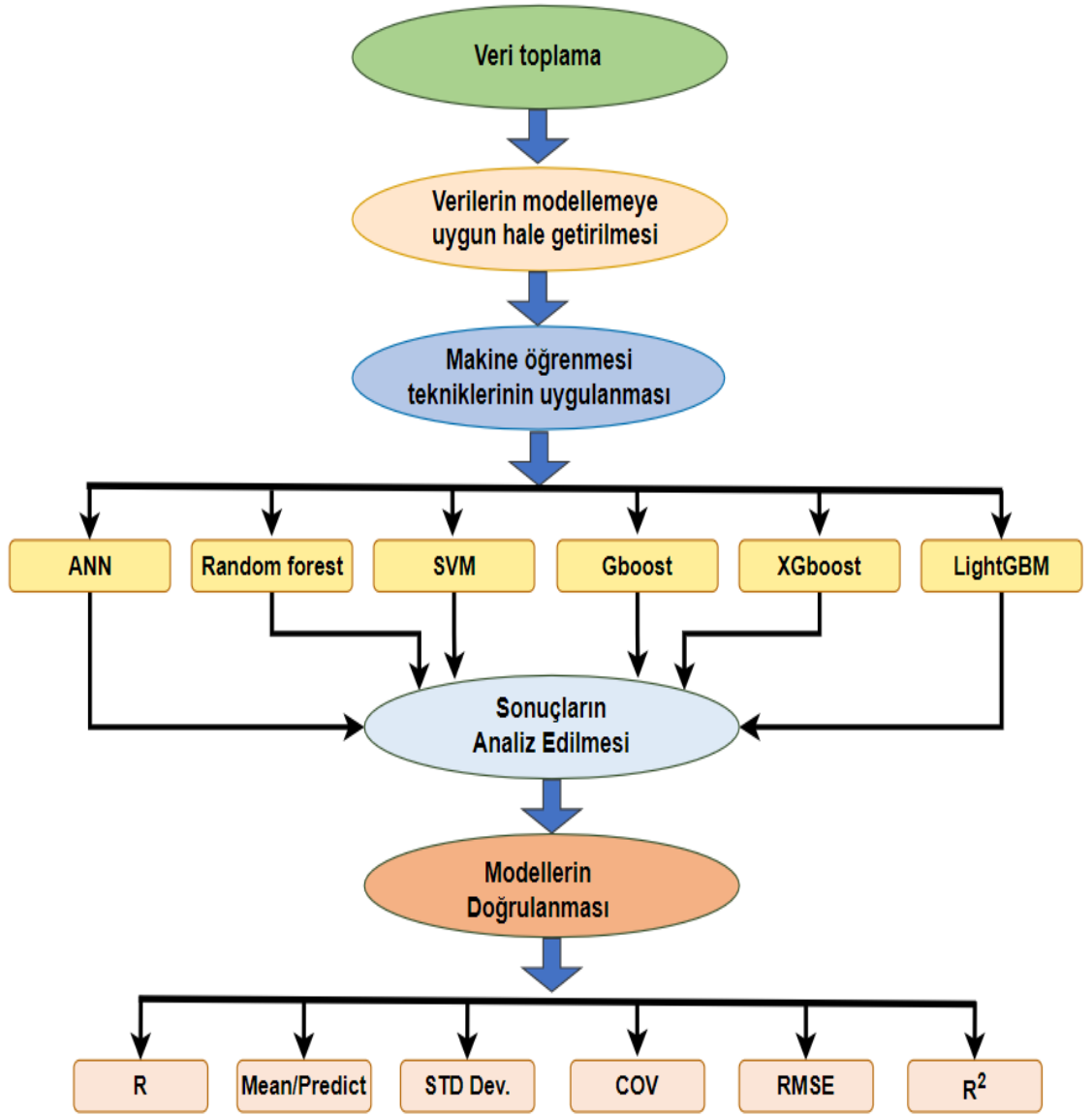
Rahmati ve Toufigh'in (2022) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun 100 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda kalan basınç dayanımını tahmin etmek için yapay sinir ağı (ANN) ve destek vektör regresyonu (SVR) algoritmalarını kullanarak üç farklı model (ANN-1, ANN-2 ve SVR) eğitmişlerdir. Bu modellerin eğitiminde kullanılacak veri setini oluşturmak amacıyla farklı numuneler üretilip test edilmiş ve ek olarak literatürdeki benzer çalışmalardan da veri toplanmıştır. Eğitilen üç modelin sonuçları karşılaştırıldığında, SVR modelinin ANN modellerinden daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Eğitilen modellerin sonuçlarını iyileştirmek amacıyla hiper parametre ayarı yapılmış ve bu işlem sonucunda SVR modelinin doğruluğunun %40 oranında arttığını belirtmişlerdir. Her bir giriş parametresinin modelin sonucu üzerindeki etkisini görmek amacıyla giriş parametresi ağırlığı analizi yapmışlardır. Yapılan analize göre

sonucu en çok etkileyen parametreler ısıtma süresi ve ısıtma sıcaklığı olmuştur. Bu iki parametreye ek olarak sodyum silikat ve kurlenme süresi parametreleri, geopolimer betonun yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kalan basınç dayanımını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Yangına ve yüksek sıcaklık etkisine karşı bina güvenliğini artırmak için geopolimer betonun kullanılabileceğini belirtmişlerdir.



3. METARYAL VE METOT

Bu bölümde, çalışmada kullanılan materyal ve metotlar anlatılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak verinin nasıl toplandığı ve hangi yöntemlerle modellemeye hazır bir hale getirildiği anlatılmıştır. Ardından kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarına değinilmiştir. Son olarak modellerin nasıl oluşturulduğu anlatılmış ve sonuçları verilmiştir. Çalışmanın stratejisini gösteren akış şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Çalışmanın yöntemine ait akış şeması

3.1. Verilerin Toplanması ve Analizi

Veri setinin kalitesi, farklı veri setlerinde çalışabilen bir makine öğrenmesi modeli elde etmek için oldukça önemlidir. Makine öğrenmesi modelleri ayrıca nicelleştirilmiş temiz veriler gerektirmektedir. Bir veri seti elde etmek, diğer makine öğrenimi işlemlerine geçmeden önce önem arz etmektedir. Bu nedenle veri setinin düzgün bir şekilde toplanıp makine öğrenmesi modellerine uygun bir hale getirilmesi oldukça önemlidir.

Bu amaçla literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiş, 28 günlük geopolimer beton numunelerinin yangın dayanımını inceleyen çalışmalardan 332 adet veri seti toplanmıştır. Bu çalışmalarda, geopolimer beton üretmek için bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu (GGBS), uçucu kül (FA), metakaolin (MK), alcoffin, bambu külü (BA), volkanik tüf (VT) ve bunların çeşitli kombinasyonları kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de veri seti oluşturulurken kullanılan çalışmaların bir özeti yer almaktadır. Çizelge 3.2 ise 28 günlük geopolimer beton numunelerinin kalan basınç dayanımı dahil olmak üzere tüm nümerik parametrelere ait istatistiksel değerleri göstermektedir. Bu aralıklara ait maksimum ve minimum değerler sırasıyla molarite için 2M ile 16M, maksimum agrega boyutu için 4 mm ile 20 mm, agrega içeriği için 0.614 ile 0.79, alkali aktivatörle bağlayıcı oranı için 0.35 ile 1, alkali silikat ile alkali hidroksit oranı için 0 ile 16.4, su ilavesi miktarı için 0 ile 180 kg/m³, kür sıcaklığı için 25 °C ile 100 °C, yangın deneyi süresi için 1 ile 3 saat, maksimum yangın deneyi sıcaklığı için 650 °C ile 1100 °C ve kalan basınç dayanımı için 0 ile 68.1 MPa arasında değişiklik göstermektedir. Toplanan veri setinde eksik veriler yer almaktadır ve bu veriler daha iyi bir sonuç elde edilmesi amacıyla şu şekilde tamamlanmıştır: ‘*’ ile gösterilen veriler ilgili çalışmadaki diğer veriler (örneğin alkali aktivatör ile bağlayıcı miktarından, alkali aktivatörle bağlayıcı oranının hesaplanması) kullanılarak hesaplanmıştır. ‘**’ ile gösterilen veriler ortalama değerler kullanılarak ve ‘***’ ile gösterilen veriler ise literatüre bakılarak (örneğin laboratuvarda kürlenmeye bırakılan numuneler için 25 °C kür sıcaklığının seçilmesi) seçilmiş verilerdir. Fırın ısıtma oranına ait eksik veri sayısının fazla olmasından dolayı bu parametrenin eksik verileri tamamlanmamış ve kalan basınç dayanımının tahmin edilmesinde kullanılmamıştır. Bunlara ek olarak eksik verilerin tamamlandığı veri setine ait frekans grafikleri ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Veri setine ait kaynak özeti

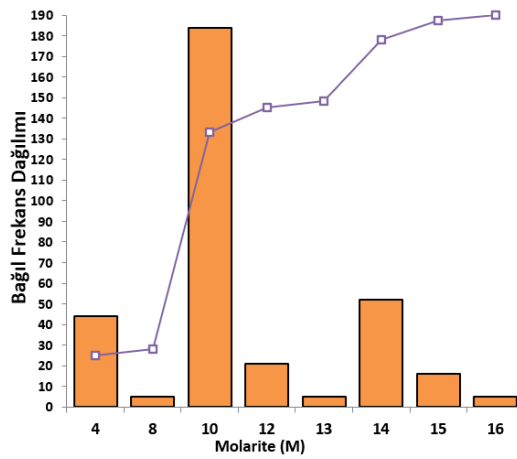
Kaynakça	Veri sayısı	Molarite (M)	Bağlayıcı malzeme	Alkali aktivatör	Maks. agrega boyutu (mm)	Alkali - bağlayıcı oranı	Alkali silika - hidroksit oranı	Numune şekli
Zhao vd. (2021)	27	14	FA+GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.4	2.5	Küp
Saavedra ve Gutierrez (2017)	6	10**	FA+GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	19	0.58*	5.5*	Küp**
Rahmadina ve Ekaputri (2017)	5	8	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.54*	2*	Silindir
Luhar vd. (2018)	5	14	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.4	2.5	Küp
Topal (2020)	90	10	GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	8	0.58*	16.4*	Küp
Zhang vd. (2020)	5	10**	MK+FA	K ₂ SiO ₃ -KOH	16	0.75*	3.6*	Küp
Sarker vd. (2014)	10	14	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.35*	2.5*	Silindir
Derinpınar (2021)	12	12	GGBS	NaOH	8	0.5*	0**	Küp
Türkmen vd. (2016)	16	15	GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	8	0.6*	2.5*	Küp
Ishak vd. (2019)	20	10	FA, FA+BA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	10	0.4	2.5	Küp
Hussin vd. (2015)	5	14	BA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20**	0.4	2.5*	Küp
Chandrakanth ve Koniki (2021)	44	4	FA+GGBS, FA+Alcoffin	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.4	2.5	Küp
Shaikh ve Vimonsatit (2015)	37	10-13-16	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	10-20	0.35	2.5*	Silindir
Benny (Joseph, 2015)	9	10	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.55	2.5	Küp
Aslani ve Asif (2019)	5	14	FA+GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	10	0.4	2.5*	Silindir
Tanyıldızı ve Yonar (2016)	12	10**	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	16	1*	1*	Küp
Kantarıcı ve Ekinci (2021)	5	12	VT	NaOH	8	0.6*	0**	Küp
Mathew ve Joseph (2018)	5	10	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	20	0.55	2.5*	Küp
Mohmmad vd. (2022)	4	12	FA+GGBS	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	12	0.5	2.5	Silindir
Nazari vd. (2019)	10	10**	FA	Na ₂ SiO ₃ -NaOH	15	0.45*	2*	Silindir

Çizelge 3.1 Devam

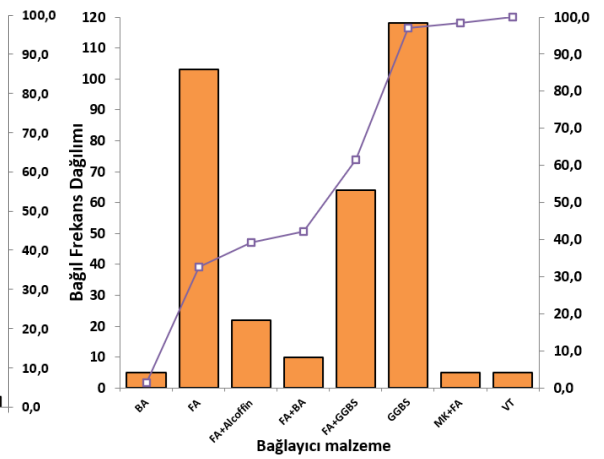
Kaynakça	Su ilavesi (Kg/m ³)	Kür şekli	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maks. deney sıcaklığı (°C)	Fırın ısıtma oranı (°C/sn)	Numunenin soğumaya bırakıldığı ortam
Zhao vd. (2021)	56.5	Ortam	28	20	3	800	15	Fırın
Saavedra ve Gutierrez (2017)	0	Ortam	28	25	2	1100	2	Laboratuvar
Rahmadina ve Ekaputri (2017)	0	Su	28	25	1	800	-	Fırın
Luhar vd. (2018)	22.32	Isı	2+26	90	2	800	4.4	Laboratuvar
Topal (2020)	33.2	Su	28***	25***	1	800	-	Laboratuvar, Fırın, Su
Zhang vd. (2020)	63	Ortam	28***	25***	1**	700	5	Laboratuvar
Sarker vd. (2014)	20	Buhar	1+27	60	2.5	1000	-	Fırın
Derinpınar (2021)	0	Ortam	28	25	1	750	-	Laboratuvar
Türkmen vd. (2016)	0	Buhar	3+25	75	1	700	-	Laboratuvar
Ishak vd. (2019)	68.13	Ortam	28	25	1	800	-	Laboratuvar, Su
Hussin vd. (2015)	0	Ortam	28	28	1	800	4.4	Laboratuvar
Chandrakanth ve Koniki (2021)	0	Ortam	28	25	1-2	800	9	Laboratuvar, Su
Shaikh ve Vimonsatit (2015)	0-14.3	Buhar	1+27	60	1**	800	8.33	Laboratuvar
Benny (Joseph, 2015)	0	Isı	1+27	100	1**	800	-	Laboratuvar
Aslani ve Asif (2019)	50	Ortam	28	20	1	900	5	Laboratuvar
Tanyıldızı ve Yonar (2016)	0	Isı	1+27	60	1	800	2.5	Laboratuvar
Kantarcı ve Ekinci (2021)	0	Isı	3+25	90	1	700	-	Laboratuvar*
Mathew ve Joseph (2018)	3.8	Isı	1+27	100	1	800	5.5	Laboratuvar
Mohmmad vd. (2022)	32	Ortam	28	25	2	650	10	Fırın
Nazari vd. (2019)	180	Ortam	28***	25***	1**	1000	-	Laboratuvar, Su

Çizelge 2.2 Veri setine ait istatistiksel değerler

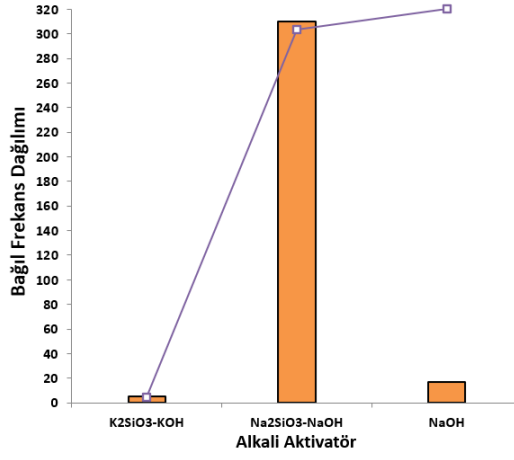
	Veri sayısı	Veri aralığı	Minimum	Maksimum	Toplam	Ortalama	Standart Sapma
Molarite (M)	322	12	4	16	3421	10.3	3.07
Maksimum Agrega Boyutu (mm)	332	12	8	20	4708	14.18	5.57
Agrega İçeriği (%)	332	0.18	0.61	0.79	240.42	0.72	0.05
Alkali-Bağlayıcı oranı	332	0.65	0.35	1	165.78	0.5	0.14
Alkali silikat/alkali hidroksit oranı	332	16.4	0	16.4	2036.5	6.13	6.32
Su ilavesi (Kg/m ³)	332	180	0	180	8871.3	26.72	35.22
Kür süresi (Gün)	332	3	25	28	9150	27.56	0.81
Kür sıcaklığı (°C)	332	80	20	100	12540	37.77	23.34
Yangın deneyi süresi (Saat)	332	2	1	3	441	1.33	0.63
Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)	332	450	650	1100	268100	807.53	72.74
Sıcaklık (°C)	332	1080	20	1100	131578	396.32	283.07
Basınç dayanımı (MPa)	332	68.11	0	68.11	10673.36	32.15	18.17



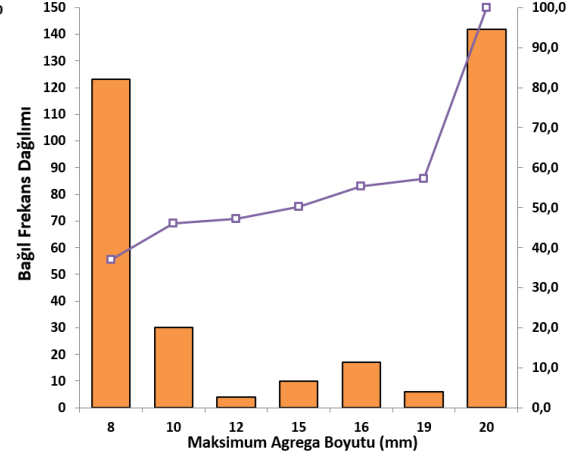
(a)



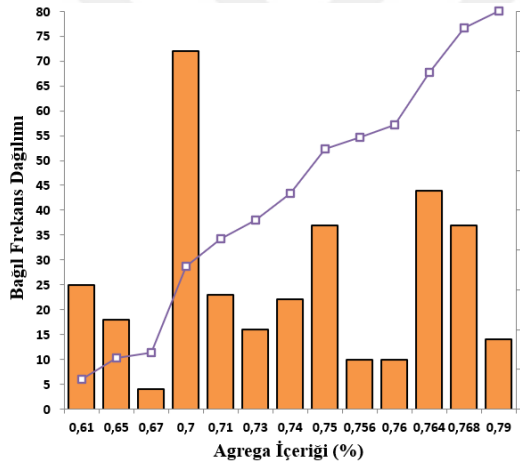
(b)



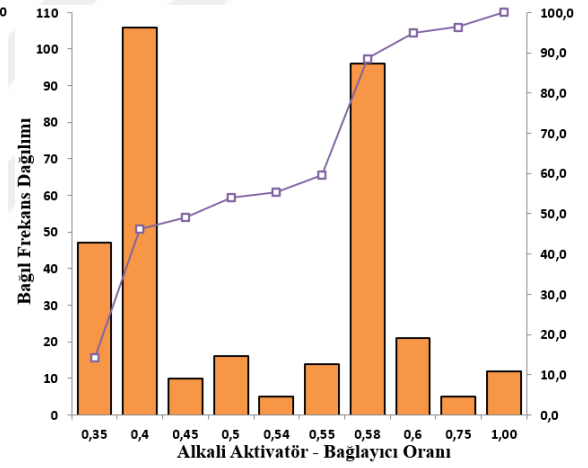
(c)



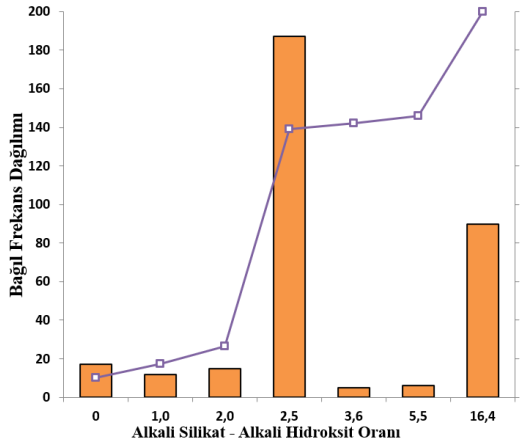
(d)



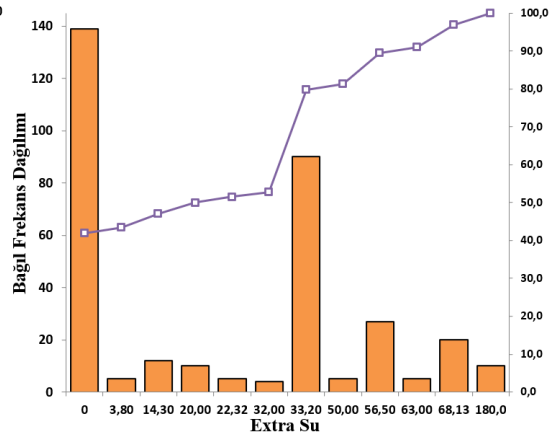
(e)



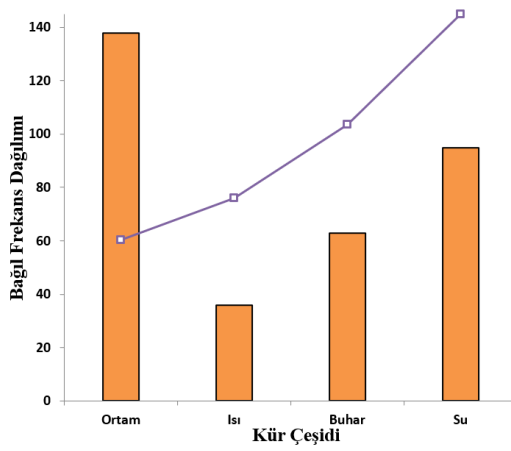
(f)



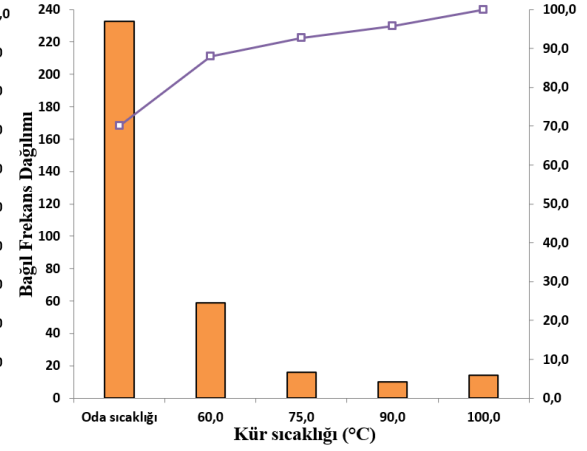
(g)



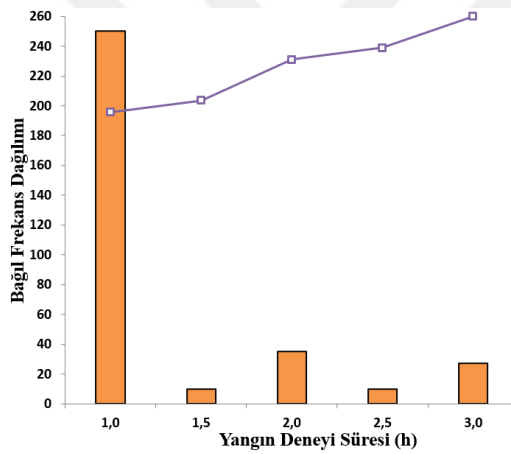
(h)



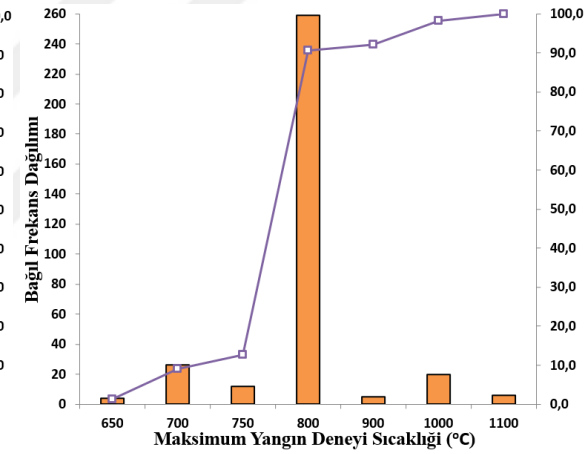
(i)



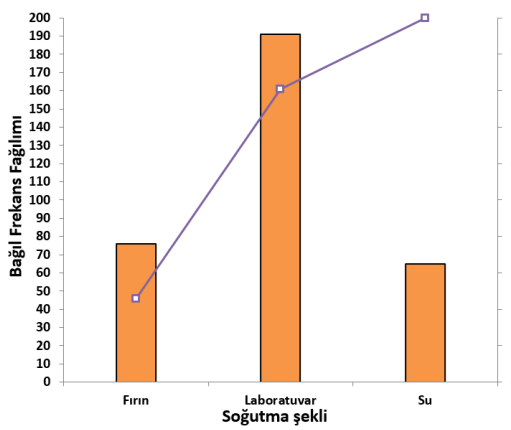
(i)



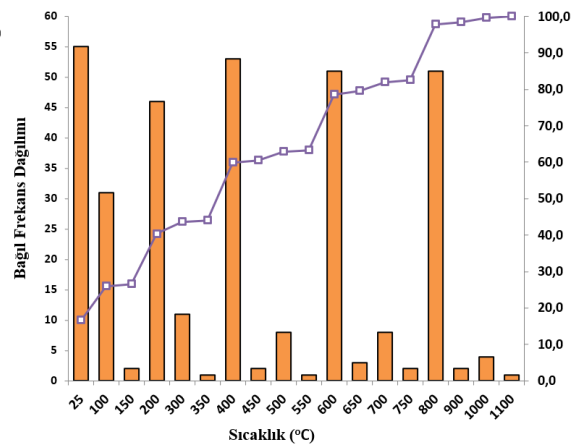
(j)



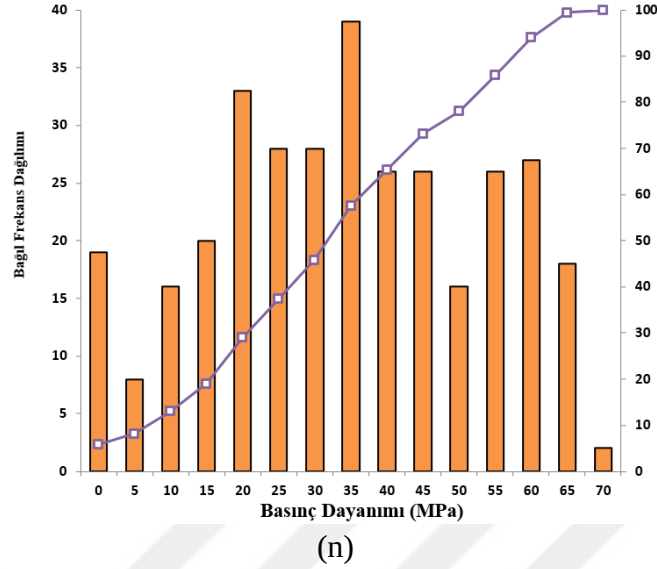
(k)



(l)

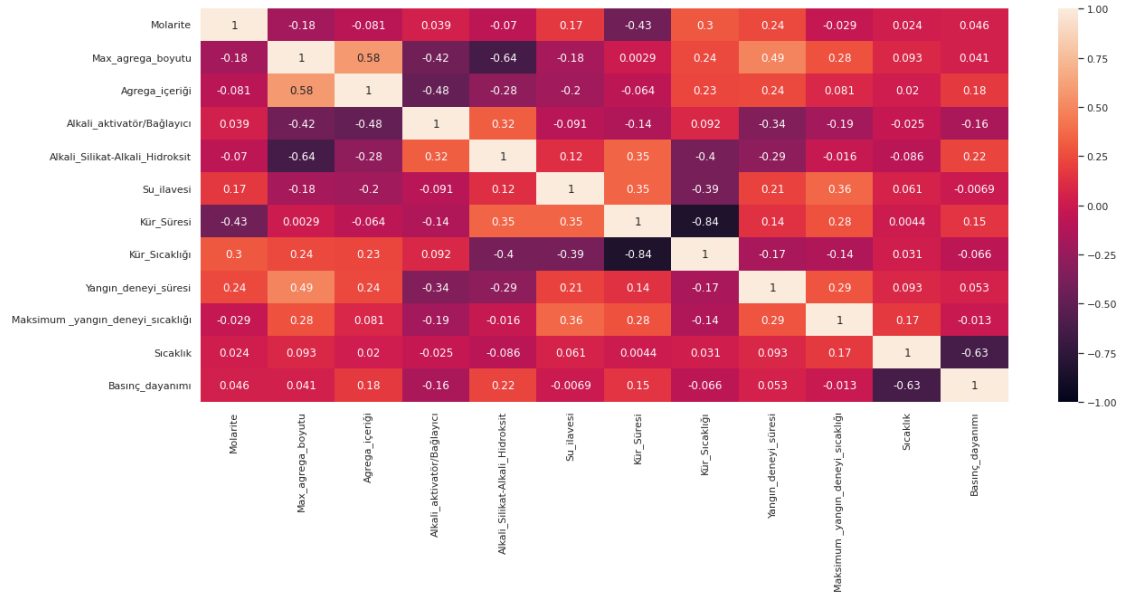


(m)



Şekil 3.2 Veri setine ait frekans dağılımı grafikleri:(a) Molarite, (b) Bağlayıcı malzeme (c) Alkali aktivatör, (d) maksimum agrega boyutu, (e) Agrega içeriği, (f) Alkali aktivatör/Bağlayıcı oranı, (g) Alkali silikat/Alkali hidroksit oranı, (h) extra su, (ı) Kür çeşidi, (i) Kür sıcaklığı, (j) Yangın deneyi süresi, (k) Maksimum yangın deneyi sıcaklığı, (l) Soğutma şekli, (m) Sıcaklık, (n) Basınç dayanımı

Veri setine ait bağımsız değişkenler arasında ilişkiler mevcuttur. Değişkenler arasındaki ilişkilere ait korelasyon katsayıları ile faydalı bir analiz yapılabilmekte ve değişkenler arasındaki bu ilişkilerin kullanılması, veri setinin daha iyi anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Korelasyon pozitif olabileceği gibi negatif de olabilmektedir. Korelasyon katsayısı sıfırdan büyük olduğunda, bu iki değişken arasında pozitif bir ilişki olduğu, sıfırdan küçük olduğunda ise bu iki değişken arasında negatif bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca korelasyon değerinin sıfır olması, bu değişkenlerin bağımsız olduğu anlamına gelmektedir. Korelasyon değerinin 1 olması ise değişkenlerin arasında mükemmel bir düzeyde ilişki olduğunu göstermektedir. Kullandığımız veri setinde çıktı değeri olan basınç dayanımı ile en iyi anlamlı ilişki -0.63 değerini veren sıcaklık parametresidir. Bu değerin negatif olması, sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımının düşeceğini ifade etmektedir. Sıcaklık parametresinden sonra basınç dayanımı ile en iyi ilişki gösteren parametreler olan alkali silikat ile alkali hidroksit oranı, agrega içeriği ve kür süresi için değerler sırasıyla 0.22, 0.18 ve 0.15 tir. Bu üç değerin korelasyon katsayısı pozitif olduğundan bu değerlerde artış olması halinde yangın deneyi sonrası kalan basınç değerine olumlu etkisinin olması beklenir. Diğer parametrelere ait korelasyon katsayıları Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Veri setine ait korelasyon katsayıları

Veri setindeki eksik veriler tamamlandıktan sonra bir diğer önemli konu ise şekil ve boyut etkisini en aza indirmek için numune şekilleri ve boyutları arasında dönüşümlerin yapılmasıdır. Zira incelenen çalışmalarda farklı şekil ve boyutlarda numuneler kullanılmıştır. Farklı uluslararası standartlar ve kodlar, test numuneleri için çeşitli boyutlar ve şekiller önermektedir. Buna rağmen en çok tercih edilen boyutlar silindir için 150×300 mm, küp için ise 150×150×150 mm'dir. Bu numuneler standart numuneler olarak bilinmektedir (Gülşan vd., 2018). Toplanan veri setinde silindir numunelerin boyutları 100x200 mm ve 50x100 mm'dir. Küp numunelerin boyutları ise 50x50x50 mm, 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm'dir. Küp ve silindir numuneler için standart numune boyutları olarak sırasıyla 150x150x150 mm ve 150x300 mm seçilmiştir. İlk adımda küp ve silindir numuneler için denklem 3.1 ve denklem 3.2'de verilen eşitlikler kullanılarak küp ve silindir numunelerin boyutları seçilen standart numune boyutlarına dönüştürülmüştür (Gülşan vd., 2018). Bu çalışmadaki denklemlerinin kullanılmasının asıl sebebi, numune boyutunun basınç dayanımı üzerindeki etkisinin yanı sıra sıcaklık faktörünün de denklemde hesaba katılmasıdır. Kullanılan bu eşitliklerdeki f_{cu} ve f_{cy} sırasıyla küp ve silindir numunelerinin basınç dayanımını, f_{cs} 150x300 mm boyutundaki silindir numunenin basınç dayanımı, d küp numunesinin boyutunu, l_o maksimum agrega boyutunun iki katını, $R.I$ fiber takviyesi indeksini ve T ise sıcaklığı temsil etmektedir. İkinci adımda ise boyutları 150x300 mm olan silindir numuneler denklem 3.3'te verilen eşitlik yardımı ile 150x150x150 mm

boyutlu standart küp numunelerine dönüştürülmüştür (Arioğlu vd., 1999). Bu eşitlikteki $f_{k,150}$ 150x150x150 mm boyutlu küp numunenin basınç dayanımını ve $f_{s,150x300}$ ise 150x300 mm boyutlu silindir numunenin basınç dayanımını temsil etmektedir.

$$f_{cu} = \frac{0.76(f_{cs} + \frac{R.I}{26.9} + \frac{T}{86.7})}{\sqrt{1 + \frac{d}{l_o}}} + 0.81(f_{cs} + \frac{R.I}{26.9} + \frac{T}{86.7}) \quad (3.1)$$

$$f_{cy} = \frac{f_{cs} + \frac{R.I}{97.4} + \frac{T}{245.3}}{\sqrt{1 + \frac{d}{l_o}}} + 0.58(f_{cs} + \frac{R.I}{97.4} + \frac{T}{245.3}) \quad (3.2)$$

$$f_{k,150} = 0.997f_{s,150x300} + 3.597 \quad (3.3)$$

Modellemeye geçmeden yapılması gereken bir diğer işlem ise kategorik değişkenlerin nümerik hale getirilmesidir. Çünkü değişkenlerin kategorik olması regresyon analizinden yanlış sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. Genelde regresyon analiziyle bir değişkenin etkisinin ölçüleceği zaman, bu değişkenin grupları arasındaki farkın matematiksel olarak eşit olduğu varsayılmaktadır. Yani değişkenler aldığı değerlerin arasındaki farkın değişim oranına göre sonucu etkilemektedir. Fakat kategorik değişkenlere değerler atansa bile, bu sayılar arasındaki değişim oranının kategorik değişkenler arasındaki değişim oranını düzgün temsil edip etmediği anlaşılmamaktadır. Bu değerler sadece grupları sınıflandırmak amacıyla verilmiştir, gruplar arasındaki sırayı gösterse de bu sıralar arasındaki değerler eşit olmamaktadır. Bu sorunun çözümü ise değişkenlerin 1 yada 0, yani var yada yok olarak regresyon analizine dahil edilmesidir. Bu nedenle kategorik değişkenler kukla değişkenlere (dummy variable) dönüştürülerek regresyon analizinde kullanılmıştır. İlk başta veri setinde 16 adet değişken (Çizelge 3.3) olsa da, Python yardımı ile kukla değişkenleri dönüşümü yapıldıktan sonra değişken sayısı 30'a çıkmıştır. Kür çeşidi parametresi 4, soğutma şekli parametresi 3, alkali aktövatör parametresi 3 ve bağlayıcı malzeme parametresi ise 8 yeni parametreye dönüştürülmüştür. Kukla değişkenlerine dönüşüm işleminden sonra oluşan yeni parametreler dahil tüm parametreler Çizelge 3.4'de

gösterilmiştir. Dummy ve diğer dönüşümler yapılarak çalışmada kullanılan veri setinin tamamı Ek 1’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Veri setinde yer alan parametreler ve alt parametreleri

Parametreler				
Nümerik Parametreler	Kategorik Parametreler			
	Ana Parametreler	Alt Parametreler	Ana Parametreler	Alt Parametreler
Molarite		Laboratuvar		FA+Alcoffin
Alkali_silikat-Alkali_hidroksit	Soğutma_şekli	Fırın		MK+FA
Yangın_deneyi_süresi		Su		BA
Sıcaklık		NaOH	Bağlayıcı	FA+GGBS
Kür_sıcaklığı		K2SiO3-KOH		FA
Kür_süresi	Alkali_aktivatör	Na2SiO3-NaOH		FA+BA
Agrega_içeriği		Buhar		VT
Alkali_aktivatör/Bağlayıcı		Laboratuvar		GGBS
Basınç_dayanımı	Kür_şekli	Su		
Maksimum_agrega_boyutu		Isıtma		
Su_ilavesi				
Maksimum_yangın_deneyi_sıcaklığı				

Çizelge 3.4 Yeni eklenen kukla değişkenler dahil tüm parametreler

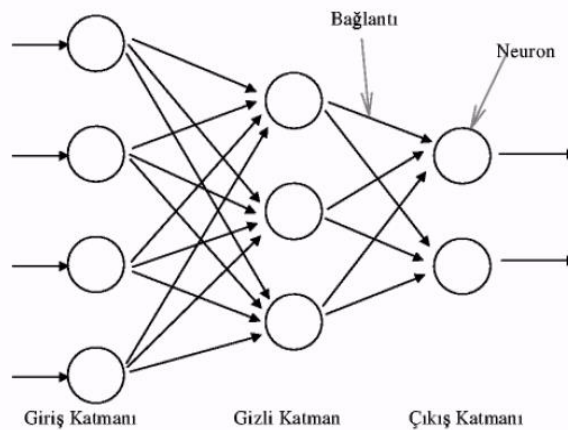
Parametreler			
Molarite	Maksimum_agrega_boyutu	Agrega_içeriği	Alkali_aktivatör/Bağlayıcı
Alkali_silikat-Alkali_hidroksit	Su_ilavesi	Kür_süresi	Kür_sıcaklığı
Yangın_deneyi_süresi	Maksimum_yangın_deneyi_sıcaklığı	Sıcaklık	Bağlayıcı_BA
Bağlayıcı_FA	Bağlayıcı_FA+Alcoffin	Bağlayıcı_FA+BA	Bağlayıcı_FA+GGBS
Bağlayıcı_GGBS	Bağlayıcı_MK+FA	Bağlayıcı_VT	Alkali_aktivatör_K2SiO3-KOH
Alkali_aktivatör_Na2SiO3-NaOH	Alkali_aktivatör_NaOH	Kür_şekli_laboratuvar	Kür_şekli_ısıtma
Kür_şekli_buhar	Kür_şekli_su	Soğutma_şekli_fırın	Soğutma_şekli_laboratuvar
Soğutma_şekli_su	Basınç_dayanımı		

3.2.Makine Öğrenmesi Algoritmaları

3.2.1. Yapay sinir ağları

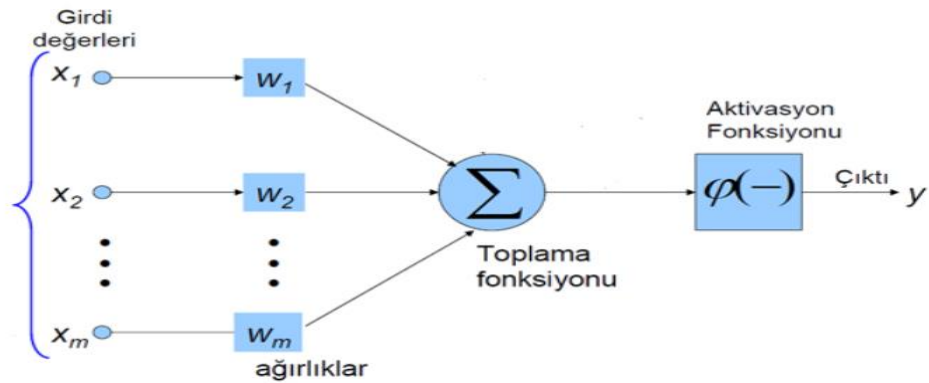
Yapay sinir ağları (ANN), insan beyninin biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli temel alınarak geliştirilmiş bir bilgisayar sistemidir. İnsan beyninde nöron adı verilen milyarlarca hücre vardır ve bu hücreler bilgiyi elektrik sinyallerine dönüştürmekle görevlidir. Dışarıdan gelen bilgi, nöronun dendritleri tarafından alınır, hücre gövdesinde işlenir ve bir çıktıya dönüştürülmektedir. ANN'nin ana görevi, beyin nöronunun çalışma şekli gibi, sisteme tanıtılan bir girdi kümesine yanıt olarak bir çıktı kümesi oluşturmaktır. İlk ANN modeli W. McCulloch ve W. Pitts tarafından, 1943'de önerilmiştir. McCulloch ve Pitts, insan beyninin hesaplama yeteneğinden esinlenerek, basit bir sinir ağı modeli geliştirmiştir (Öztemel E., 2012).

ANN'nin ana görevi, beyin nöronunun çalışma şekli gibi, sisteme tanıtılan bir girdi kümesine yanıt olarak bir çıktı kümesi oluşturmaktır. ANN üç katman içermekte ve bu katmanlar bir araya gelerek sinir ağını oluşturmaktadır. İlk katman girdi katmanıdır ve son katman ise belirli bir girdi için çıktı üreten bir çıktı katmanıdır. Giriş ve çıkış katmanları arasındaki katman ise gizli katmandır, bir veya daha fazla gizli katman olabilmektedir. Birden fazla gizli katmana sahip bir sinir ağının mimarisine çok katmanlı algılayıcı denir. Şekil 3.4'de ANN'nin yapısı gösterilmektedir (Shalev-Shwartz ve Ben-David, 2014).



Şekil 3.4 Yapay sinir ağının yapısı (Shalev-Shwartz ve Ben-David, 2014)

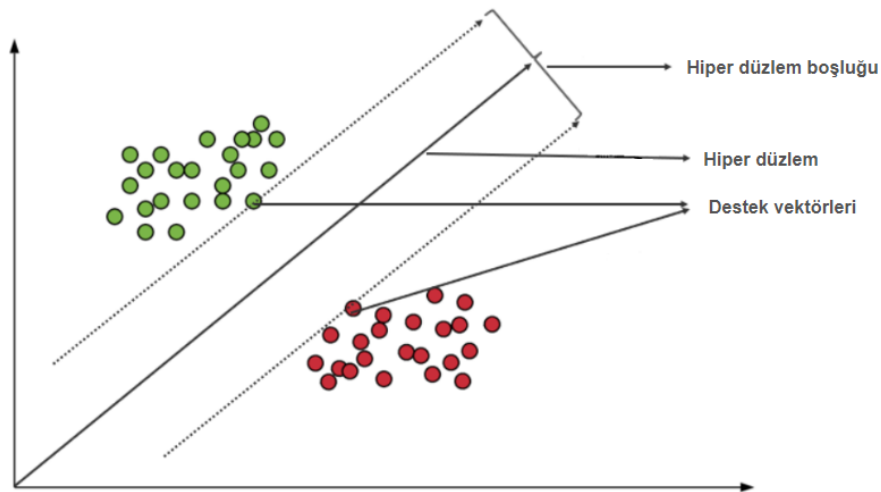
Biyolojik sinir ağlarında bulunan nöronlara benzer bir şekilde yapay sinir ağlarında işlem elemanı bulunmaktadır. İşlem elemanı, ANN'nin çalışmasına esas teşkil eden en küçük ve temel bilgi işleme birimidir. İşlem elemanları bir veya birden fazla girdi almakta ve tek bir çıktı vermektedir. Bu çıktı yapay sinir ağının dışına verilen çıktılar olabileceği gibi başka işlem elemanlarına girdi olarak da kullanılabilir. Oluşturulan işlem elemanı modellerinde bazı farklılıklar olsa da genel olarak bir işlem elemanı modeli 5 bileşenden oluşmaktadır (Şekil 3.5). Bunlar sırasıyla girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktıdır. Diğer işlem elemanlarından ya da dışarıdan gelen bilgiler girdi olarak adlandırılmaktadır. Bilgiler, bağlantılar üzerindeki ağırlıklar üzerinden işlem elemanına girer ve ağırlığı oranınca etki etmektedir. Toplama fonksiyonu, bir işlem elemanına gelen net girdiyi hesaplamak için girişlerin ilgili ağırlıkla çarpımlarının toplamını kullanmaktadır. Birleştirme fonksiyonu, maksimum alan, minimum alan ya da çarpım fonksiyonu olmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu, toplam fonksiyonundan elde edilen net girdiyi bir işlemden geçirerek işlem elemanının çıktısını belirlemektedir. Aktivasyon fonksiyonu genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Hücrenin gerçekleştireceği işleve göre çeşitli tipte aktivasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. En uygun aktivasyon fonksiyonunun seçimini büyük ölçüde yapay sinir ağının verileri ve ağın neyi öğreneceği etkilemektedir. Bu fonksiyonların en çok kullanılanları sigmoid ve hiperbolik tanjant fonksiyonlarıdır. Ağın bir modelin ortalama davranışını öğrenmesi isteniyorsa sigmoid fonksiyonu, ortalamadan sapmanın öğrenilmesi isteniyorsa hiperbolik tanjant fonksiyonu kullanılması önerilmektedir.



Şekil 3.5 Yapay sinir ağları işlem elemanı

3.2.2. Destek vektör makinesi

Destek vektör makinesi, doğrusal ve doğrusal olmayan sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılabilen denetimli bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Destek vektör makinesi (Support Vector Machines, SVM) algoritmaları, lojistik regresyon algoritmalarının devamıdır. Daha sıkı şartları olan bir lojistik regresyon algoritmasıdır. Lojistik regresyon algoritmaları olasılıkları verirken, SVM algoritmaları sadece bir sınıf kimliği vermektedir (Goodfellow vd., 2019). Destek vektörleri ayrıca regresyon problemlerinde de kullanılmakta ve bu durumda destek vektör regresyonu (Support Vector Regression, SVR) olarak adlandırılmaktadır. SVR mantık olarak lineer regresyona benzer. Lineer regresyonda veriyi en iyi şekilde temsil edecek doğru kullanılırken, SVR de doğru yerine hiper düzlem kullanılmaktadır. Hiper düzlemin her iki yanında bulunan en yakın veri noktalarına destek vektörleri denmektedir. Bu vektörler sınır çizgisini haritalandırmak için kullanılmaktadır. Diğer regresyon modelleri tahmin ile gerçek değer arasındaki farkı en aza indirmeye çalışırken, SVR en iyi çizgiyi eşik değerine sığdırmaya çalışmaktadır. Şekil 3.6'da hiper düzlem, destek vektörleri ve hiper düzlem boşluğu gösterilmiştir. Çekirdek yöntemi, doğrusal olmayan bir regresyon için verileri daha yüksek bir boyuta dönüştürmekte ve oluşan bu düzlem sayesinde doğrusal ayırma yapmaktadır. Bu yöntem daha çok verilerin doğrusal olarak sınıflandırılmadığı durumlarda kullanılmaktadır. En çok kullanılan çekirdek yöntemleri Gaussian (RBF) çekirdek, Polynomial çekirdek Sigmoid çekirdek ve Lineer çekirdektir.

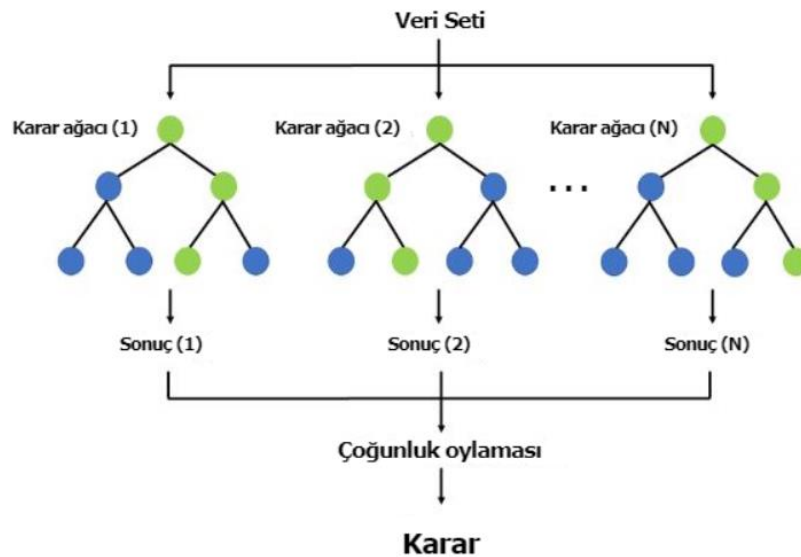


Şekil 3.6 Destek vektör makinesi hiper düzlem gösterimi

3.2.3. Rastgele orman

Rastgele orman, Breiman ve Cutler tarafından 2001’de önerilmiştir. Birçok karar ağacından gelen tahminleri farklı veri alt kümelerinde toplayan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. En yaygın kullanılan topluluk sınıflandırma algoritmalarından biri olan Rastgele orman, mevcut durumlardan rastgele oluşturulmuş örnekler kullanan birden çok ağaçtan oluşmaktadır. Bir örneği sınıflandırmak için ormandaki her ağaca bir girdi vektörü verilir ve her ağaç için bir sonuç elde edilmektedir. Topluluk sınıflandırma yöntemleri, birden fazla sınıflandırıcı tarafından üretilen sonuçları kullanarak yeni verileri sınıflandırmaya çalışmaktadır. Rastgele orman algoritması, verilen sonuçlardan en çok oyu alan sınıfı seçmektedir (Shalev-Shwartz and Ben-David, 2014).

Bu yöntem, topluluk yöntemlerinin ve rastgele örneklemenin optimize edilmiş özelliklerini içerdiğinden, doğru genellemeler yapma ve tahminlerde birbirine yakın sonuçlar verme konusunda oldukça başarılıdır. Şekil 3.7’de n karar ağacından oluşan Rastgele orman bileşenleri gösterilmektedir. Buna göre, sınıflandırılacak veri seti için her ağaçtan bir sınıflandırma sonucu gelir ve her ağaç söz konusu sınıflandırma tahmini için "oy verir". Ormandaki tüm ağaçlardan en çok oyu alan sınıf nihai sonuçtur. Rastgele orman yöntemini karar ağacı yönteminden ayıran yönü ise geliştirilen ağaçların budanmamasıdır. Bu sebeple bu yöntem çok hızlıdır ve makine öğrenmesi konusunda aşırı öğrenmeye (bölüm 3.2.8) karşı da dayanıklıdır (Shalev-Shwartz ve Ben-David, 2014).

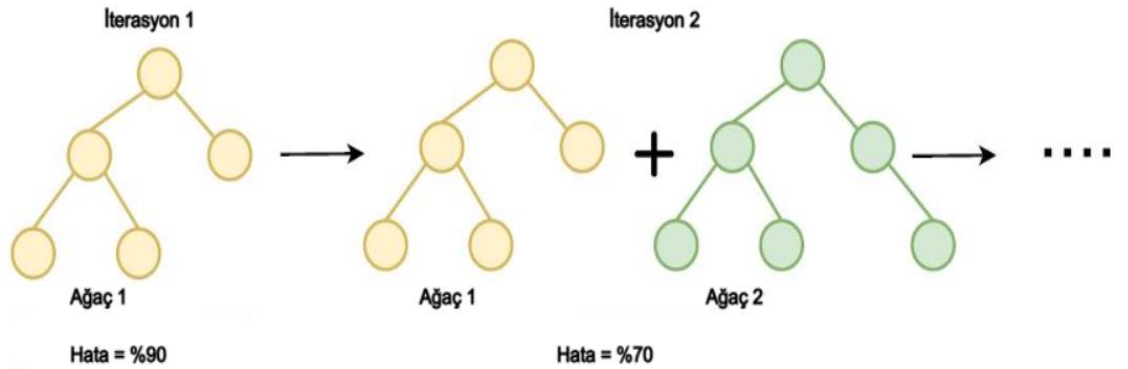


Şekil 3.7 N adet ağaçtan oluşan rastgele orman bileşenleri

3.2.5. Gboost (Gradyan Güçlendirme)

İlk olarak Friedman tarafından önerilen Gradient boost yani gradyan güçlendirme, bir güçlü öğrenici yaratmak amacıyla zayıf veya temel öğrenicilerin dizisini kullanan bir hızlandırıcı makine öğrenmesi modelidir. Zayıf bir öğrenici, performansı en azından rastgele tahminden daha iyi olan kişi olarak tanımlanmaktadır. Modelde, modelin kaybı olarak da bilinen genel hatayı en aza indirmek amacıyla yeni zayıf öğreniciler eklenmektedir (Friedman, 2001).

Gradyan güçlendirmede tüm modelin genel hatasını azaltmak için her seferinde yeni bir zayıf öğrenici eklenmekte ve eğitilmektedir. Aşamalı toplama (topluluk) modeli olan gradyan güçlendirmede ekleme işleminden sonra modeldeki mevcut zayıf öğrenicilerde değişiklik olmamaktadır. Gradyan güçlendirme makineleri, zayıf öğrenici olarak regresyon ağaçlarını kullanmaktadır. Zayıf öğrenicileri eklerken kaybı en aza indirmek için Gradyan güçlendirme makinelerini eğitmek amacıyla yinelemeli gradyan tabanlı öğrenme algoritması kullanılmaktadır. Algoritma özellikle ilk iterasyonda, genel eğitim hatasını azaltmak amacıyla ilk ağacı (ilk zayıf öğreniciyi) öğrenmektedir. İkinci iterasyonda Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, birinci ağacın yaptığı hatayı azaltmak için ikinci ağacı öğrenmektedir. Bu işlem genel hata istenen bir düzeye ulaşana kadar yani iyi kalitede bir model oluşturulana kadar tekrarlanmaktadır (Friedman, 2001).



Şekil 3.8 Gboost ağaçları

3.2.6. XGboost (Olağanüstü Gradyan güçlendirme)

Olağanüstü Gradient Boosting yani XGBoost modeli, Gradyan güçlendirme karar ağacına dayalı geliştirilmiş bir model olan Karar Ağacı modelini temel almaktadır. XGBoost, ilk olarak 2011 yılında Tianqi Chen ve Carlos Guestrin tarafından önerilen ve

birçok bilim insanının takip çalışmasında sürekli olarak optimize edilen ve geliştirilen bir modeldir. Model, Boosting Tree modellerine dayalı bir öğrenme yapısıdır (Chen ve Guestrin, 2016).

Geleneksel Boosting Tree modelleri yalnızca ilk türeve ait bilgiyi kullanmaktadır. N'inci sıradaki ağacı eğitirken, dağıtılmış eğitimi uygulamak zordur çünkü öncekinden geriye kalan n-1 ağaç zaten kullanılmıştır. XGBoost, kayıp fonksiyonunda ikinci dereceden bir Taylor serisi kullanmakta ve paralel hesaplama için CPU'nun multithread özelliğini (çoklu iş parçacığı kullanımı) otomatik olarak kullanabilmektedir. Ayrıca XGBoost, aşırı uyumu (overfitting) önlemek için çeşitli yöntemler kullanmaktadır. XGBoost algoritması kısaca şu şekilde tanımlanmaktadır. Ağaç modelini toplam yöntemiyle entegre etmek için totalde K adet ağaç olduğunu varsayıp ve temel ağaç modelini temsil etmek için F'yi kullanırsak denklem 3.4'te verilen eşitlik oluşmaktadır (Chen and Guestrin, 2016):

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in F \quad (3.4)$$

Amaç fonksiyonuna ait eşitlik denklem 3.5'te verildiği gibi olmaktadır:

$$L = \sum_i l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'teki L, tahmin değeri ile gerçek değer arasındaki hatayı temsil eden kayıp fonksiyonudur. Denklem 3.6'da verilen Ω ise aşırı uyumu önlemek için kullanılan düzenleme fonksiyonudur:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2 \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da verilen T, ağaç başına düşen yaprak sayısını, w ise her bir ağacın yapraklarının ağırlığını temsil etmektedir. Amaç fonksiyonunun ikinci dereceden

Taylor açılımındaki hesaplamalardan sonra, amaç fonksiyonuna ait bilgi kazancını veren eşitlik denklem 3.7’de verildiği gibi olmaktadır:

$$\text{Kazanç} = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sum_{i \in I_L} g_i)^2}{\sum_{i \in I_L} h_i + \lambda} + \frac{(\sum_{i \in I_R} g_i)^2}{\sum_{i \in I_R} h_i + \lambda} + \frac{(\sum_{i \in I} g_i)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] - \gamma \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de görülebileceği gibi, ağacın büyümesini engellemek ve modelde aşırı uyum olmasını önlemek için bir bölme eşiği olan γ değeri eklenmektedir. Yaprak düğümünün bölünmesine ancak bilgi kazancı γ ’dan büyükse izin verilmektedir. Bu amaç fonksiyonunu optimize ederken ağaca önceden değer verilmesine eşdeğerdir. Buna ek olarak aşırı uydurmayı önlemek için iki teknik daha kullanılmaktadır. İlki yaprak düğümlerdeki tüm numune ağırlıkları eşiğin altındaysa bölmenin durdurulması, ikincisi ise her ağaç oluşturulduğunda özelliklerin rastgele atanmasıdır.

3.2.7. LightGBM

LightGBM, Gboost (gradyan güçlendirme) temelli bir algoritma olmasının yanı sıra ve XGboost’un (Olağanüstü Gradyan güçlendirme) birçok özelliğini miras almaktadır. Bununla birlikte, LightGBM’in ağaç yapılandırmasında XGBoost’tan farklı olarak Gradyan Tabanlı Tek Taraflı Örnekleme (GOSS) ve Özel Değişken Paketi (EFB) olarak adlandırılan iki önemli teknik farkı vardır (Ke vd., 2017). GOSS, büyük gradyanlara sahip örnekleri tutan ancak küçük gradyanlara sahip örneklerin bir kısmını rastgele çıkaran bir örnekleme aracıdır. Karar ağaçlarının doğruluk oranını korumasının yanında veri sayısını azaltmayı hedeflemektedir. Gboost her bir değişken için bilgi kazancını (information gain) hesaplamak amacıyla tüm veri örneklerini taramakta, ancak GOSS yalnızca önemli verileri kullanmaktadır. Bu sayede verinin dağılımını fazla etkilemeden veri sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. EFB ise doğruluk oranına zarar vermeden değişken sayısını azaltmaya çalışır ve buna bağlı olarak model verimliliğini arttırmayı hedeflemektedir. EFB’nin iki işlem adımı vardır: ilki paket oluşturmak ve ikincisi ise değişkenleri aynı pakette birleştirmektir. Kısacası GOSS ve EFB, veri örneklerinin sayısını ve boyutunu önemli ölçüde azaltırken aynı zamanda yüksek doğruluğu korumaktadır. Sonuç olarak, LightGBM daha hızlıdır ve daha az bellek gerektirir. Ayrıca LightGBM, veri kümesinin boyutu küçük olduğunda aşırı uydurmaya eğilimlidir (Q. Zhao vd., 2019).

3.2.8. Aşırı (overfitting) ve eksik (under fitting) öğrenme

Makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı esnasında karşılaşılan sorunlardan biri ise sadece modelin eğitildiği verilerde değil, yeni verilerde de iyi bir performans elde etmektir. Bir modelde elde edilen hata iki şekilde sınıflandırılır. İlki eğitim verisi kullanılarak elde edilen sonuçlara ait hatalar, ikincisi ise henüz elde edilemeyen veriler ile yapılacak olan tahminlere ait hatalardır. Bir makine öğrenimi algoritmasının ne kadar iyi performans gösterdiğini belirleyen faktörler şunlardır (Goodfellow vd., 2019):

- Eğitim verisinden kaynaklanan hatayı en aza indirme
- Eğitim ile test verilerine ait hatalar arasındaki farkı en aza indirme yeteneği

Makine öğrenmesinde iki temel sorun vardır, aşırı öğrenme ve eksik öğrenme. Yetersiz öğrenmede eğitim seti kullanılarak eğitilen model ile yapılan tahmin sonuçlarına ait hata yüksek çıkmaktadır. Yani model yeterince düşük bir hata değeri elde edememektedir. Eğitilen model test verisi kullanılarak tahmin yaptırıldığında elde edilen hata ile eğitim verisi kullanılarak elde edilen hata arasındaki fark çok büyükse modelde aşırı öğrenme olduğu anlamına gelmektedir (Goodfellow vd., 2019). Aşırı ve yetersiz öğrenmeyi engellemek için kullanılan yöntemler şöyledir (Elite Data Science, 2022):

- Çapraz doğrulama
- Modeli daha çok veri ile eğitme
- Hatalı giriş parametrelerini kaldırma
- Model eğitimini erken sonlandırma
- Düzenleştirme (Regularization)
- Topluluk öğrenmesi yöntemi

3.3. Makine Öğrenmesi Modellerinin Oluşturulması ve Analizi

Bu çalışmada 6 farklı makine öğrenmesi algoritması incelenmiş ve her biri için en iyi sonucu verecek şekilde toplam 6 adet model eğitilmiştir. Modellerin eğitilmesi için Python (Van Rossum ve Drake, 2009) tabanlı programlama kullanılmıştır. Eğitilen

modellerde aşırı ve eksik öğrenmenin önlenmesi amacıyla 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır.

Makine öğrenmesinde model veri ile öğrenmekte ve yine veri ile test edilmektedir. Mevcut verinin tamamı modeli eğitmek için kullanılırsa, modeli test etmek için yeni verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple kullanan veri setinin %70'ini eğitimde ve kalan %30'unu ise modellerin test edilmesi amacıyla ayrılmıştır. Oluşturulan bu veri setlerinin asıl veri setini daha iyi temsil edebilmesi için test ve eğitim verileri rastgele seçilerek alınmıştır.

Test ve eğitim veri setleri oluşturulduktan sonraki bir adım ise modellerin eğitilmesidir. Fakat varsayılan hiper parametreler kullanılarak eğitilen modeller iyi performans sağlamamaktadır. Farklı doğrulama yöntemleri yardımı ile doğrulama seti kullanılarak model performansının izlenmesi, performansı ile ilgili sorunları önlemek için oldukça önemlidir. Hiper parametreler, parametrelerde olduğu gibi modelin eğitilmesi sırasında öğrenilmemektedir. Modelleme aşamasına geçilmeden önce belirlenmesi gerekmektedir. Hiperparametre setlerinin bulunmasında farklı yöntemler kullanılsa da bu yöntemlerin çalışma prensibi şöyledir: Algoritma hiper parametre setlerinin rastgele bir kısmını ya da tamamını kullanarak modeli eğitmekte ve çapraz doğrulama yapmakta, en iyi sonucu veren hiper parametre setini seçmektedir. Python ile oluşturulan ANN, SVR Rastgele Orman, Gboost, XGboost ve LightGBM modelleri bir Scikit-learn kütüphanesi (Pedregosa vd., 2011) algoritması olan GridSearchCv kullanılarak en iyi parametre setleri bulunmuştur. Bu algoritma her bir hiperparametre için bütün kombinasyonları denemekte ve çapraz doğrulama yapmaktadır. Bu işlem sonucunda en iyi sonucu veren hiperparametre seti elde edilmekte ve modeldeki varsayılan hiperparametreler elde edilen yeni hiperparametrelere göre optimize edilerek daha iyi bir model eğitilmektedir. Bu çalışmada eğitilen modellere ait hiper parametreler, en iyi parametre seti seçilirken arama yapılan hiper parametre aralıkları ve varsayılan değerler Çizelge 3.5'te verilmiştir. En iyi performans gösteren hiper parametre değerleri ise her bir model için Çizelge 3.6'da ayrı ayrı gösterilmiştir. Eğitilen modeller, kullanılan Python kodları ve ilk oluşturulan veri seti çalışmanın sonunda rar dosyası olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 Model hiper parametrelerinin varsayılan değerleri ve arama yapılan aralıklar

Model	Hiperparametre	Değer Aralıkları	Varsayılan değer
ANN	learning_rate	constant, invscaling, adaptive	constant
	alpha	0.1, 0.01, 0.02, 0.005	0.0001
	hidden_layer_sizes	(20,20),(100,50),(150,50),(50,50,50), (100,50,150),(300,200,150)	(100)
SVR	kernel	rbf, poly, linear, sigmoid, precomputed	rbf
	epsilon	0-1	0.1
	gamma	0,00001-1	0
	C	0.01, 0.1 ,1 ,0.4, 5, 10, 20, 30, 40, 50	1
Rastgele orman	n_estimatör	100,200,500,1000,2000	100
	max_features	3,5,10,15	Auto
	max_depth	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	None
Gboost	Subsample	1, 0.5, 0.75	1
	n_estimators	100, 200, 500, 1000, 2000	100
	learning_rate	0.001, 0.01, 0.1, 0.2	0.1
	max_depth	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	5
XGboost	colsample_bytree	0.4, 0.5, 0.6, 0.9, 1	1
	n_estimators	100, 200, 500, 1000	100
	max_depth	2, 3, 4, 5, 6	6
	learning_rate	0.1, 0.01, 0,5	0.3
LightGBM	n_estimators	20,40,100,200,500,1000,2000	100
	colsample_bytree	0.4, 0.5, 0.6, 0.9, 1	1
	max_depth	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	1
	learning_rate	0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0,5, 1	0.1

Çizelge 3.6 Tüm modellere ait en iyi hiper parametre değerleri

Model	Hiperparametre	En iyi değer
ANN	learning_rate	adaptive
	alpha	0.02
	hidden_layer_sizes	(300,200,150)
SVR	kernel	rbf
	epsilon	0-1
	gamma	0.1
	C	40
Rastgele Orman	n_estimatör	100
	max_features	10
	max_depth	9
Gboost	subsample	0.5
	n_estimators	2000
	learning_rate	0.01
	max_depth	4
XGBoost	colsample_bytree	0.4
	n_estimators	200
	max_depth	6
	learning_rate	0.1
LightGBM	n_estimators	500
	colsample_bytree	0.9
	max_depth	6
	learning_rate	0.3

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde eğitilen modellerin performanslarının daha objektif bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla ortalama hata (ortalama test/tahmin), standart sapma, kovaryans (COV), ortalama karesel hatanın karekökü ($RMSE$), korelasyon katsayısı (R) ve tanımlayıcılık katsayısı (R^2) değerleri hesaplanmıştır. Ortalama hata değeri ile modelin yaptığı tahminlerin genel olarak gerçek değerden büyük ya da küçük olduğu anlaşılabilmektedir. Ortalama hatanın alabileceği en iyi değer 1'dir, yani ortalama hata 1'e ne kadar yaklaşır ise modelin yaptığı tahminler gerçek değerlere o kadar yaklaşmaktadır. Ortalama hata tek başına tahmin verilerinin dağılımını tam olarak göstermemektedir. Çünkü ortalamadan çok küçük bir değer ile çok büyük bir değerin var olması ortalamaya çok etki etmese de dağılımı olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, bu verilere ait standart sapma değerinin bilinmesi önem taşımaktadır. Standart sapma ile verilerin ortalamadan ne kadar uzaklaştığının tespit edilmesi mümkündür. Kovaryans değeri ise iki değişkenin birlikte ne kadar değiştiğini ifade etmektedir. Kovaryans sıfıra ne kadar yakın olursa, o ölçüde değişkenler arasında lineer bir ilişki olmadığı söylenebilmektedir. Bir diğer performans değerlendirme ölçütü olan ortalama karesel hatanın karekökü ($RMSE$) verinin ne kadar değiştiğini belirlemek için kullanılır ve sıfıra ne kadar yakın ise modelin o derecede doğru tahmin yaptığını göstermektedir. Son olarak korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak göstermektedir ve korelasyon katsayısının karesi olan tanımlayıcılık katsayısı ise deneysel verilerin bir eğriye ne kadar iyi derecede uyduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısı -1 ile 1 arasında değer alırken, tanımlayıcılık katsayısı 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Tanımlayıcılık katsayısı 1'e ne kadar yakın ise modelin yaptığı tahminler ile gerçek değerler arasındaki fark o kadar az olmaktadır. Eğitilen her modele ait ortalama test/tahmin, standart sapma, COV , $RMSE$, R ve R^2 değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Bir diğer önemli konu ise modellerin test verileri için ne derece doğru tahmin yaptığıdır. Çizelge 4.2'de verilen eğitim ve test skorları değerlerine bakıldığında SVR modeli hariç tüm modellerin test ve eğitim skorları yakın değerler vermiştir. SVR modeli eğitim verisi için 0.9745 sonucunu verirken test verileri için 0.6151 skorunu vermiştir. Bu iki değer arasındaki farkın çok yüksek olması bu modelin elde edilecek yeni veriler için doğru sonuçlar vermeyeceğini göstermektedir. Bu durum SVR

modelinin eğitim verilerini aşırı öğrenmesinden kaynaklanabileceği gibi, bu modelin kullandığı çekirdek yönteminin test verilerinin dağılımını iyi temsil etmediğini ve doğru tahminler yapmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.1 Model değerlendirme metriklerine ait sonuçlar

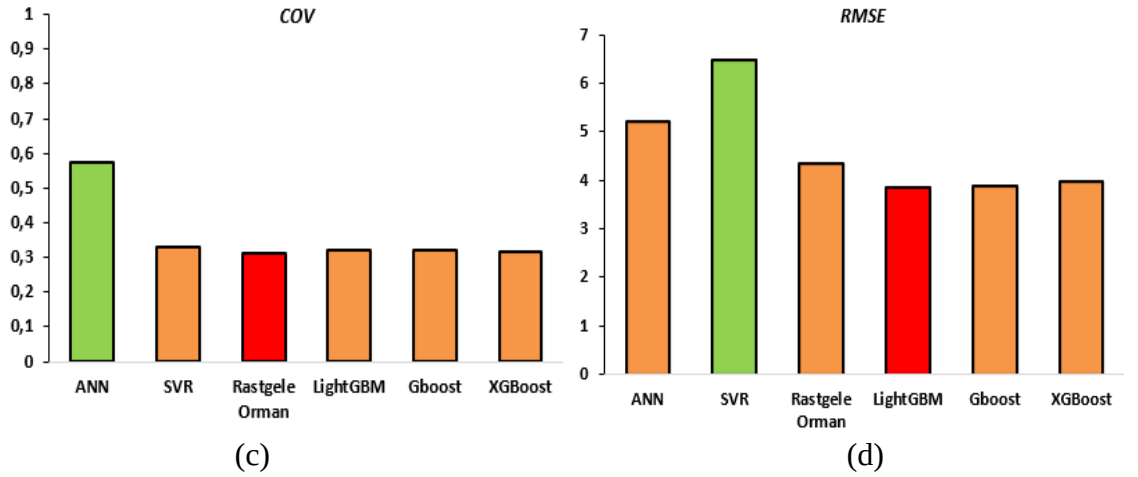
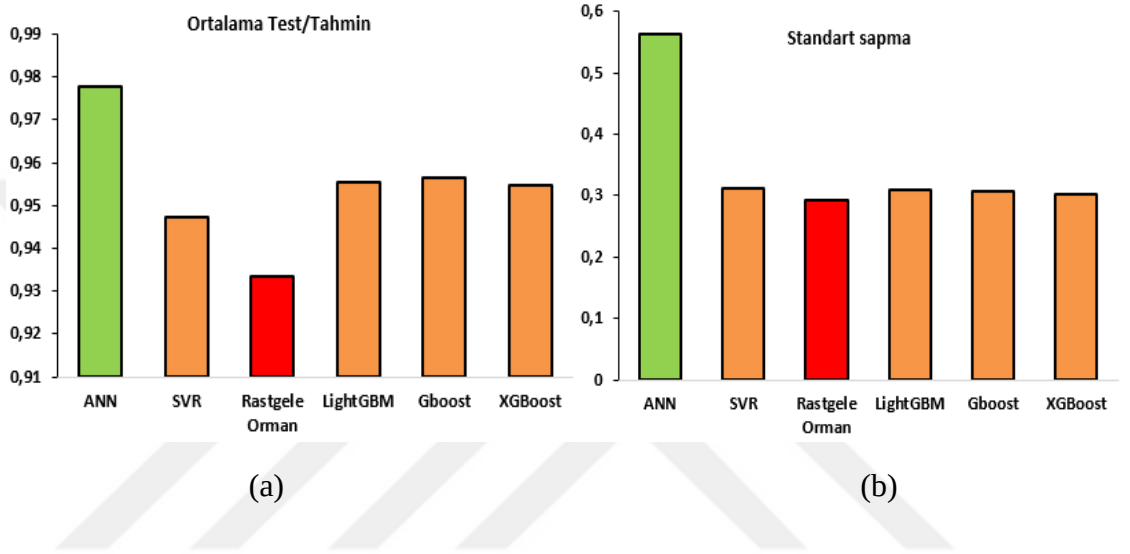
Model	Ortalama test/tahmin	Standart sapma	COV	RMSE	R	R ²
ANN	0.9776	0.5621	0.5750	5.2211	0.9588	0.9193
SVR	0.9472	0.3129	0.3303	6.4899	0.9340	0.8724
Rastgele Orman	0.9333	0.2921	0.3129	4.3438	0.9721	0.9449
Gboost	0.9563	0.3061	0.3201	3.8696	0.9770	0.9546
XGBoost	0.9548	0.3030	0.3173	3.9668	0.9758	0.9523
LightGBM	0.9554	0.3084	0.3228	3.8581	0.9771	0.9548

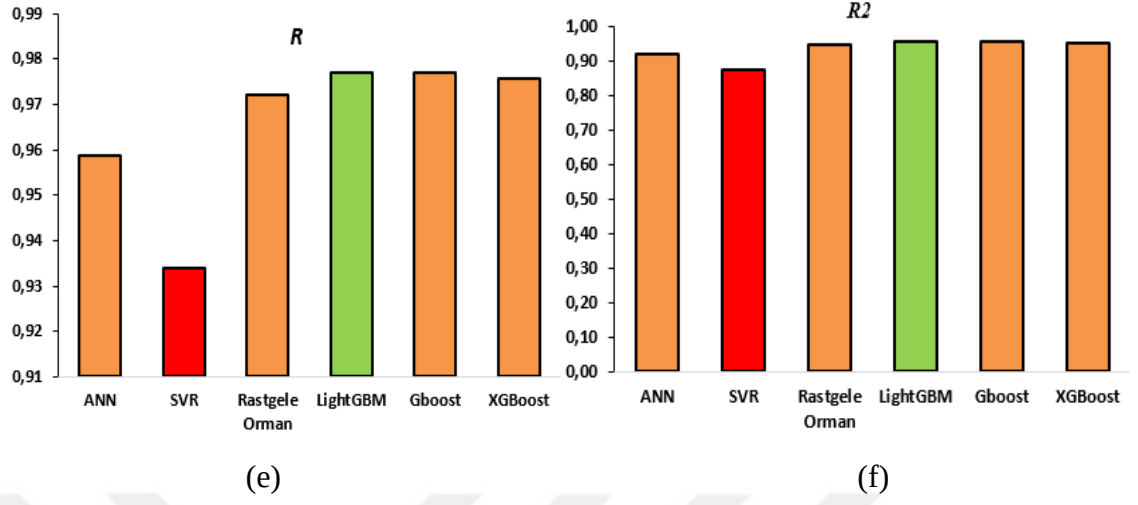
Çizelge 4.2 Eğitilen modellere ait eğitim ve test skorları

Model	Eğitim skoru	Test skoru	Genel skor
ANN	0.9451	0.8470	0.9193
SVR	0.9745	0.6151	0.8724
Rastgele Orman	0.9657	0.8874	0.9449
Gboost	0.9790	0.9000	0.9546
XGBoost	0.9794	0.8839	0.9523
LightGBM	0.9794	0.8929	0.9548

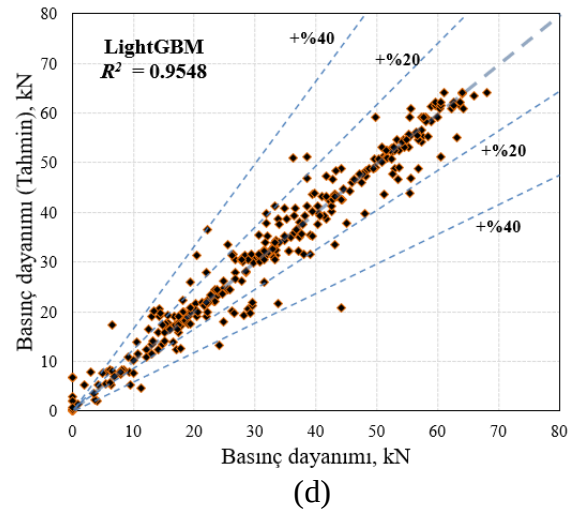
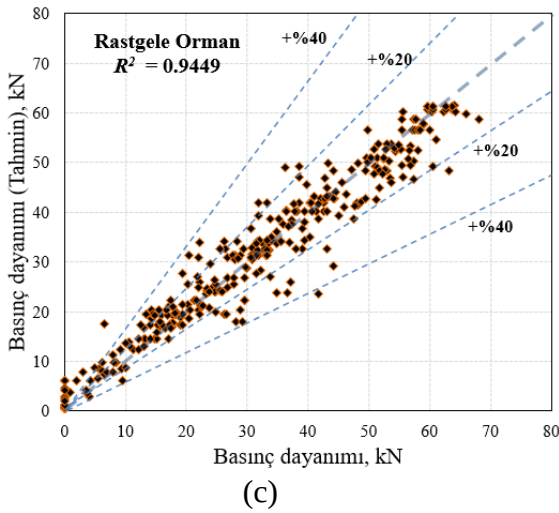
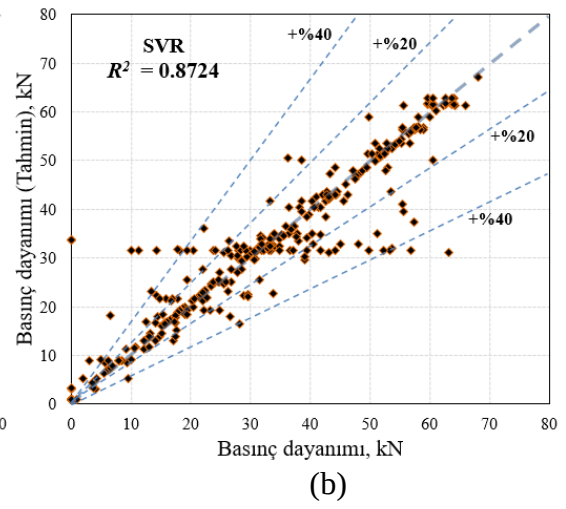
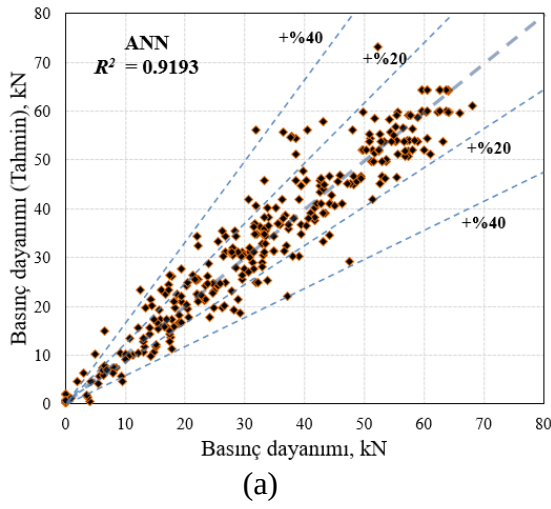
Çizelge 4.1’de verilen sayısal verilere ait grafikler daha iyi bir değerlendirme yapılabilmesi amacı ile Şekil 4.1’de verilmiştir. Her bir performans değerlendirme metriği için bütün modellere ait değerler verilmiş, maksimum değerler yeşil ve minimum değerler ise kırmızı ile gösterilmiştir. Ortalama test/tahmin değerleri incelendiğinde ANN modeli en iyi değer olan 1’e en yakın sonucu vermiş, diğer modeller ise 0.95 değerine yakın sonuçlar vermiştir. Ortalama test/tahmin değerinin 1’e çok yakın çıkması modelin doğruluğunun teyidi açısından önemlidir. Modelin tahmin değerlerinin test değerlerine oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Bu durum, çalışmanın ana konusu olan yangın sonrası geopolimer betonun kalan basınç dayanımının incelenmesi için de oldukça önemlidir. Bölüm 2.2’de incelenen çalışmalara göre, yüksek sıcaklık etkisinde beton içeriğindeki malzemelerde farklı genleşmeler ve kimyasal değişiklikler olmaktadır. Bunun sonucunda betonda çatlaklar ve hatta dökülmeler meydana gelmekte, betonun şekli ve boyutları değişebilmektedir. Bundan dolayı betonun ne ölçüde dayanım kaybettiğinin tespiti oldukça zorlaşmaktadır. Eğitilen modeller içinde en düşük test/tahmin değeri 0.9333 olarak hesaplanmış ve bu değer Rastgele Orman modelinden elde edilmiştir. Test/tahmin değeri için 0.9333 skoru düşük olmasa da Rastgele Orman modelinin diğer modellere göre daha aykırı tahmin değerleri verebileceğini göstermektedir. Standart sapma ve kovaryans değerlerine ait grafikler incelendiğinde ANN modelinin en yüksek değerleri sağladığı görülmüştür. Bu sonuçların diğer modellere yakın ve oldukça düşük olması bu modelin yaptığı tahminlerde aykırı sonuçların oldukça az olduğunu göstermektedir. Bu aykırı değerlerin düzeltilmesi veya göz ardı edilmesi sonucunda belki de bu model en iyi sonuçları sağlayan model olacaktır. Bir diğer model performansı değerlendirme metriği olan ortalama karesel hatanın karekökü grafiğine bakıldığında en yüksek değerleri veren model SVR modeli olmuştur. En düşük değeri ise LightGBM modeli vermekte, Gboost ve XGboost ise en düşük değerleri veren diğer modeller olmaktadır. Son olarak R ve R^2 yani korelasyon katsayısı ile tanımlayıcılık katsayısı grafikleri incelendiğinde en düşük değeri LightGBM modeli vermiş, Gboost ve XGboost ise en düşük değerleri veren diğer modeller olmuştur. Ek olarak bütün modellere ait tahmin değerlerinin gerçek değerlerle olan dağılımları Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’deki grafikler incelendiğinde, modellere ait grafiklerin Şekil 4.1’de verilen grafiklerin sonuçları ile örtüştüğü görülmektedir. En iyi sonucu veren üç model olan LightGBM, Gboost ve XGboost

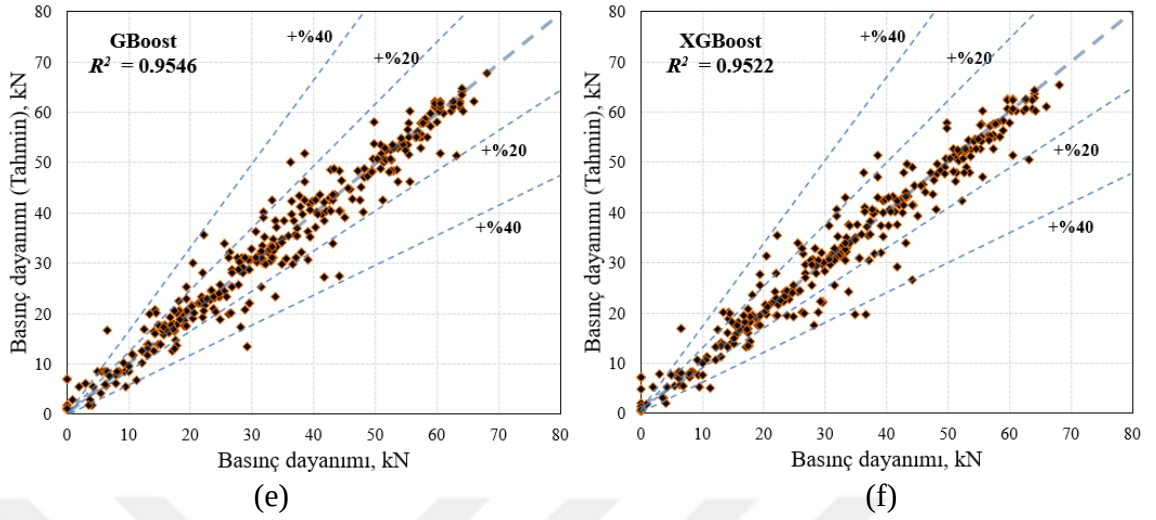
modellerine ait tahmin verilerinin, gerçek veriler ile olan dağılımlarının en iyi dağılım çizgisine çok yakın bir şekilde konumlandığı görülmektedir. Bu modellere ait değerlerin çoğunun en iyi çizgi ile %20 sapma çizgileri arasında olduğu, %40 sapma çizgisini geçen sayılı değer olduğu görülmektedir.





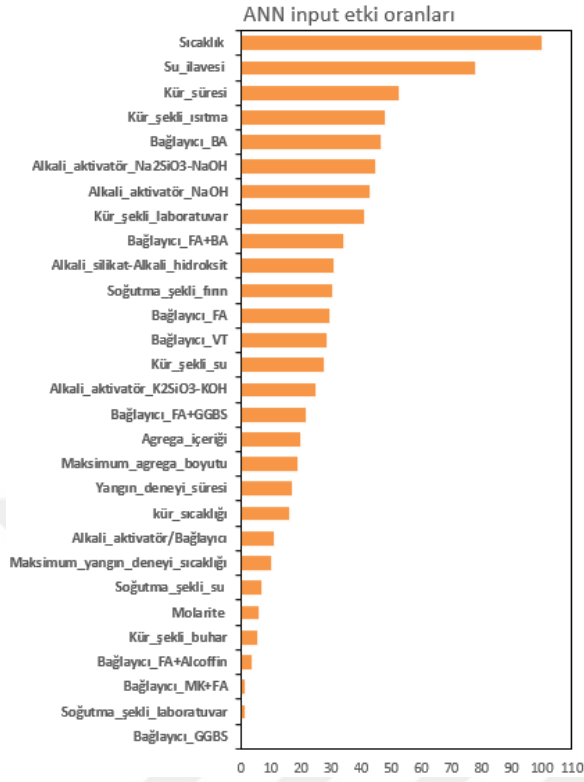
Şekil 4 Model sonuçlarına ait değerlendirme metrikleri: (a) Ortalama test/tahmin, (b) standart sapma, (c) Kovaryans, (d) $RMSE$, (e) R , (f) R^2



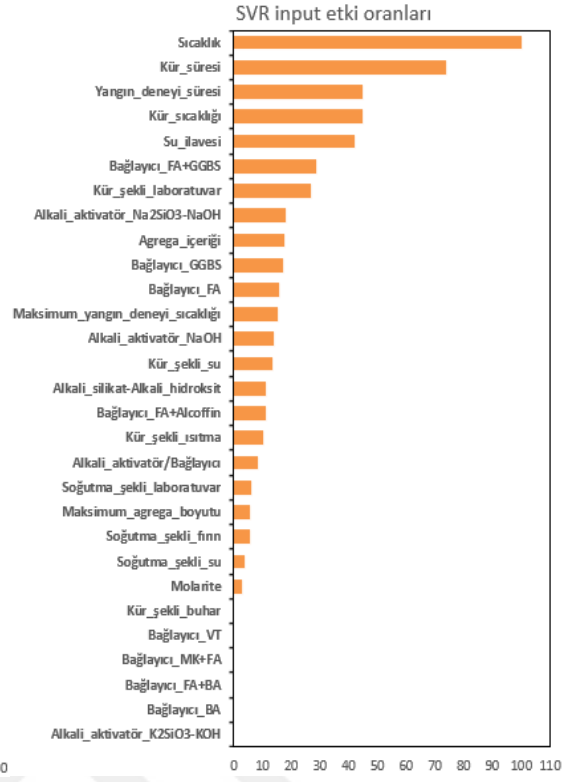


Şekil 5 Eğitilen tüm modellere ait gerçek ve test değerlerinin dağılımları: (a) ANN, (b) SVR, (c) Rastgele Orman, (d) LightGBM, (e) Gboost, (f) XGBoost

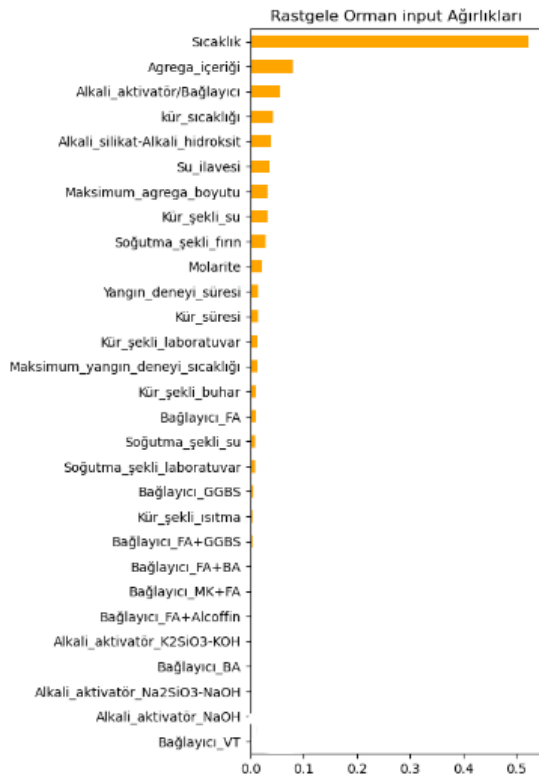
Bütün modellere ait performans değerlendirme metrikleri incelenmiş ve modellerin artı ve eksi yönleri tartışılmıştır. Fakat bu yöntem tek başına yeterli olmamakta ve hangi parametrenin sonuca ne kadar etki ettiği belirlenememektedir. Bu sebeple eğitilen modellerin vereceği sonuçların, literatürde daha önceden yapılmış çalışmalar ile benzer sonuçların verip vermeyeceği tespit edilememektedir. Bu nedenden dolayı eğitilen 6 modele ait giriş parametrelerinin (input ağırlıkları) ağırlıklarına ait grafikler Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde çıkan sonuçların literatür ile örtüştüğü görülmüştür. Bir model hariç diğer 5 modelde zaten bu çalışmanın ana araştırma konularından biri olan sıcaklık parametresi ilk sırada yer almıştır. XGboost modeline ait input ağırlıklarına bakıldığında diğer 5 model ile çeliştiği görülmüştür. Bu sebeple bu modele ait tahmin sonuçlarının Geopolimer betonun yüksek sıcaklık altında kalan basınç dayanımının tahmin edilmesinde kullanılması önerilmemektedir. XGboost harici diğer 5 modelin giriş ağırlıklarının önem sıralaması incelendiğinde genel olarak benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu 5 model için sıcaklık parametresinden sonra en önemli diğer parametreler su ilavesi, agrega içeriği, alkali silikat-alkali hidroksit oranı, kür süresi, kür sıcaklığı, bağlayıcı çeşidi vb. olmuştur.



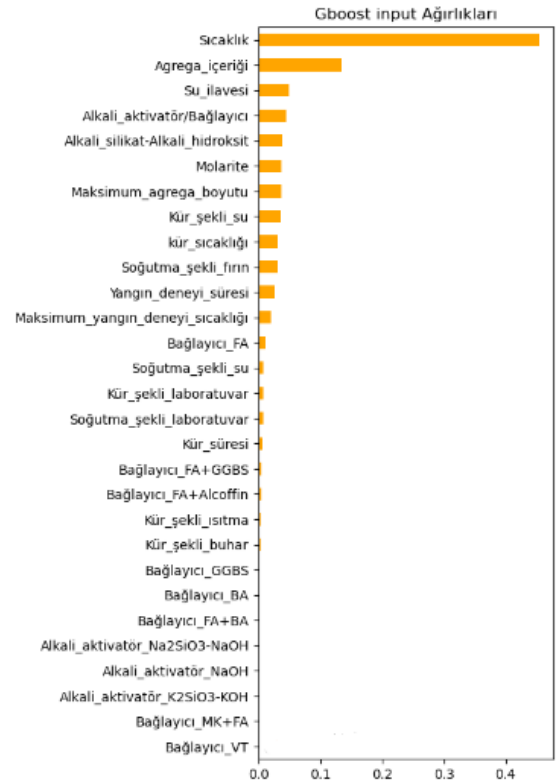
(a)



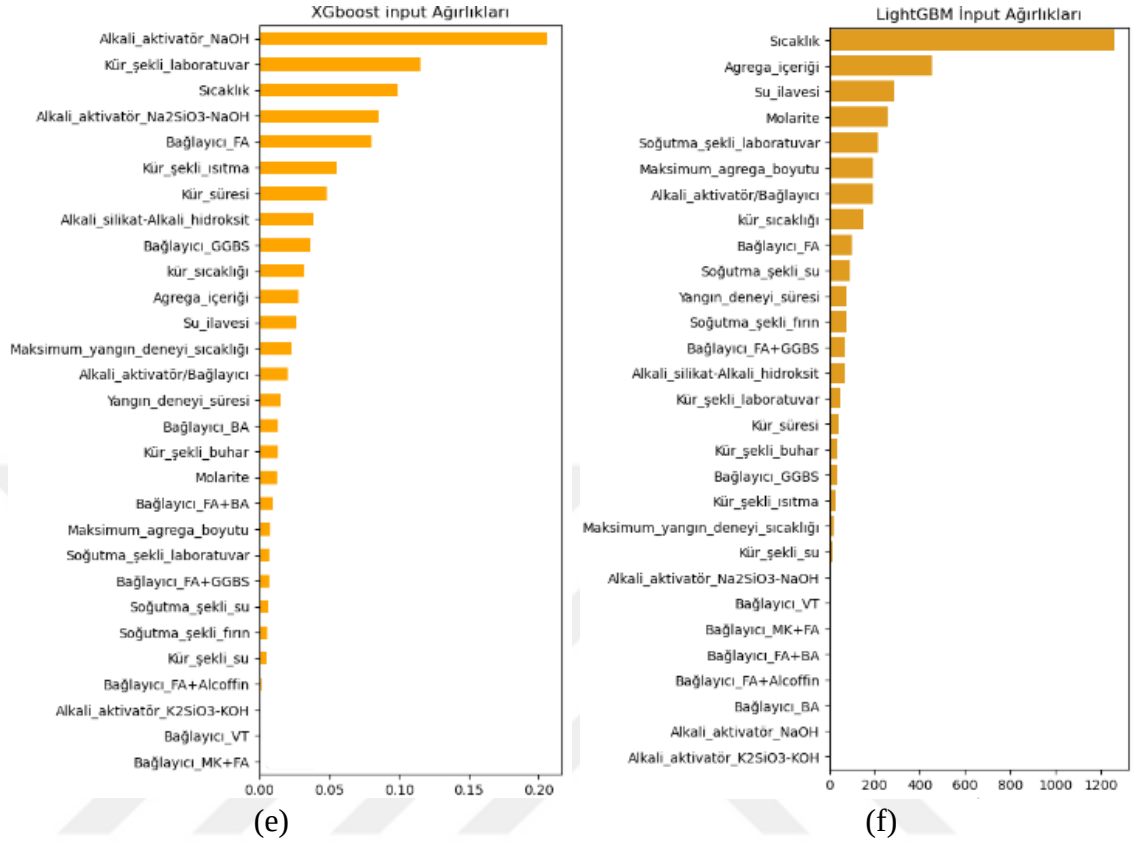
(b)



(c)



(d)



Şekil 6 Eğitilen modellere ait input ağırlıkları: (a) ANN, (b) SVR, (c) Rastgele orman, (c) Gboost, (e) XGboost, (f) LightGBM

Şekil 4.3'te verilen input parametrelerinin ağırlığı yani giriş parametrelerinin ağırlığına ait sonuçlara bakıldığında bölüm 2.1'de verilen çalışmalardaki parametrelere benzese de ANN, SVR ve XGboost modellerine ait sıralamalar genel olarak literatürdeki çalışmalarla örtüşmemektedir. Literatürdeki çalışmalar ve benzer bir çalışma olan Rahmati ve Toufigh'in (2022) yaptığı çalışmaya bakıldığında en önemli parametrelerin sıcaklık, kür süresi, kür sıcaklığı, molarite, agrega içeriği, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı gibi parametreler olması beklenmektedir. Su içeriği parametresinin bütün modeller için ikinci en önemli parametre olması ise su içeriği miktarındaki artışın diğer parametreleri direk ya da dolaylı olarak etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Örneğin su içeriğinde artış olması en önemli parametrelerden biri olan molarite değerini düşürmektedir. Yine benzer şekilde su oranındaki artış alkali aktivatör/bağlayıcı oranını da etkileyecektir. Molarite parametresine bakıldığında ise bu parametre ANN, SVR ve XGboost modelleri için input ağırlığı sıralamasında son

sıralarda yer almıştır. Bu veri seti için bu üç modelin kullanılamayacağı açıkça görülmüştür.

Yapılan tüm değerlendirmeler sonucunda bu çalışmada toplanan veri seti için en iyi ve en doğru tahmin yapacak olan modeller LightGBM ve Gboost modelleri olmuştur. Bu iki model çok iyi sonuçlar vermiş ve verdiği sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Benzer bir çalışma olan Rahmati ve Toufigh'in (2022) yaptığı çalışmadaki modeller eğitim verileri için 0.98 ile 0.99 gibi yüksek skorlar verse de test verileri için 0.77 ile 0.82 arası skorlar vermiştir. Rahmati ve Toufigh'in (2022) çalışmasında kullanılan iki algoritma olan yapar sinir ağları ve destek vektör makineleri algoritmaları yürütülen bu çalışmada da kullanılmış ve aynı şekilde elde edilen eğitim ve test skorları arasındaki fark diğer algoritmalara göre yüksek olmuştur (Çizelge 4.2). Ayrıca yürütülen bu çalışmada daha geniş bir parametre aralığı kullanılarak modellerin daha doğru sonuçlar vermesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada en iyi iki sonucu veren iki model olan LightGBM ve Gboost modelleri, test ve eğitim verilerine ait skorlar için yaklaşık 0.8'lik bir fark vermiştir. Bu sonuca bakıldığında bu iki modelin elde edilecek yeni veriler için doğru tahminler yapabileceği görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ana konusu, geopolimer betonun yangın maruziyeti sonrası basınç dayanımının çeşitli makine öğrenmesi algoritması kullanılarak modellenmesi olmuştur. Geopolimer betonun, sıradan Portland çimentolu betonun yerini alabilecek alternatif bir yapı malzemesi olmasından dolayı bu probleme ait çözüm yöntemi veya çözüm önerilerinin bulunması oldukça önemlidir. Bu amaçla farklı kaynaklar taranmış ve modellemede kullanılacak olan veri seti oluşturulmuştur. 6 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılarak her biri için birer tane model eğitilmiştir. Eğitilen bu modeller incelenmiş ve farklı yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucu elde edilen sonuçlar ve yapılan öneriler şöyledir:

Makine öğrenmesi algoritmalarının geopolimer betonun yüksek sıcaklık etkisinden sonra kalan basınç dayanımının tahmininde oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüş ve kullanılabilirliği test edilmiştir. Eğitilen modeller içinde, bu çalışmada oluşturulan veri seti için en iyi sonuç veren iki modelin LightGBM ve Gboost olduğu görülmüştür. XGboost modeli çok iyi sonuçlar verse de giriş parametrelerine ait ağırlıklara bakıldığında bu modelden elde edilen sonuçların eğitilen diğer modeller ile çeliştiği görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalara paralel olarak sıcaklık parametresinin yanı sıra su ilavesi, agrega içeriği, alkali silikat-alkali hidroksit oranı, kür süresi, kür sıcaklığı, kür şekli, bağlayıcı çeşidi, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, maksimum agrega boyutu, molarite ve yangın deneyi süresi gibi parametrelerin geopolimer betonun kalan basınç dayanımını etkilediği görülmüştür.

Makine öğrenmesi algoritmalarının skorlarının en iyi modelin seçiminde yetersiz kaldığı, bu skorlarla birlikte performans değerlendirme metrikleri ve input ağırlıklarının oldukça önemli olduğu görülmüştür.

Makine öğrenmesi algoritmalarının gerçek değerlere çok yakın tahminler yaptığı görülmüş, bu sayede geopolimer beton ile yapılacak yapı maliyetlerinin önceden tahmin edebileceği öngörülmüştür.

Kullanılan makine öğrenmesi algoritmasının özelliklerinin yanında kullanılan veri seti ve özelliklerinin eğitilen modelin sonucuna etki ettiği; en güncel olan makine

öğrenmesi algoritmalarının daha iyi performans sağladığı ve ayrıca, Python tabanlı programlama ile makine öğrenmesi algoritmalarının kurulumu ve kullanımının kolay olduğu sonucuna varılmıştır.

Geopolimer betonun çeşitli özelliklerinin tahmin edilmesinde yeni yapılan çalışmalarla birlikte daha kapsamlı bir veri tabanı oluşturulabilir ve sıradan kullanıcıların kullanabileceği bir arayüz geliştirilebilir, bu sayede geopolimer betonun kullanımının yaygınlaştırılmasında önemli derecede katkı sağlanabilecektir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, geopolimer betonun çeşitli mekanik özelliklerinin sıradan Portland çimentolu betonunun mekanik özelliklerine benzediği hatta daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sebeple bu malzemeye ait özellikler piyasada sıkça kullanılan analiz programlarına entegre edilebilir, bu sayede geopolimer betonun kullanımı yaygınlaştırılabilir.

6. KAYNAKÇA

- Abdulkareem, O. A., Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., & Saif, A. A. (2014). *Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete*. *Construction and Building Materials*, 50, 377–387.
- Alhamad, A., Yehia, S., Lublóy, É., & Elchalakani, M. (2022). *Performance of Different Concrete Types Exposed to Elevated Temperatures: A Review*. *Materials*, 15(14), 5032.
- Altındal, İ. (2020). *Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 59.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N., & Girgin, C. (1999). *Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi*. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 40–50.
- Aslani, F., & Asif, Z. (2019). *Properties of Ambient-Cured Normal and Heavyweight Geopolymer Concrete Exposed to High Temperatures*. *Materials*, 12(5), 740.
- Ay, S. (2010). *Farklı Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 80.
- Badar, M. S. (2014). *Selected durability studies of geopolymer concrete with respect to carbonation, elevated temperature, and microbial induced corrosion*. Yüksek Lisans Tezi, Louisiana Tech University, College of Engineering Science, Louisiana. 122.
- Bing Hui, M., Zhu, H., Cui, X. M., He, Y., & Gong, S. Y. (2014). *Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers*. *Applied Clay Science*, 99, 144–148.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P., & Palma, S. (2021). *Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review*. *Minerals*, 11(12), 1–28.

- Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Uysal, M. (2018). *High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers*. *Construction and Building Materials*, 187, 1190–1203.
- Chandrakanth, V., & Koniki, S. (2021). *Comparative studies on strength properties of flyash based geopolymer concrete incorporating ggbs and alccofine subjected to elevated temperature*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1091(1), 012025.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). *XGBoost: A scalable tree boosting system*. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-Aug, 785–794.
- Chithambaram, S. J., Kumar, S., Prasad, M. M., & Adak, D. (2018). *Effect of parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete*. *Structural Concrete*, 19(4), 1202–1209.
- Davidovits, J. (1991). *Geopolymers*. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656.
- Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. In *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. 131–149.
- Davidovits, J. (2002). *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . Geopolymer 2002 Conference*, 1–16.
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition*. In J. Davidovits.–Saint-Quentin, France, 680.
- Derinpınar, A. N. (2021). *Cam tozu katkılı ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların yangın dayanımının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya. 82.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: The current state of the art*. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.

- Elite data science, 2022. **Overfitting in Machine Learning: What It Is and How to Prevent It**. <https://elitedatascience.com/overfitting-in-machine-learning#how-to-prevent> (30.01.2023).
- Friedman, J. (2001). ***Greedy Function Approximation : A Gradient Boosting Machine***. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232.
- Ganesh, A. C., & Muthukannan, M. (2019). ***Effect of Elevated Temperature over Geopolymer Concrete***. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1S4), 450–453.
- Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021). ***Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature***. *Construction and Building Materials*, 273, 121752.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2019). ***Deep learning***. MIT press.
- Gülşan, M. E., Abdulhaleem, K. N., Kurtoglu, A. E., & Evik, A. (2018). ***Size effect on strength of fiber-reinforced Self-Compacting Concrete (SCC) after exposure to high temperatures***. *Computers and Concrete*, 21(6), 681–695.
- Hadi, M. N. S., Zhang, H., & Parkinson, S. (2019). ***Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability***. *Journal of Building Engineering*, 23(February), 301–313.
- Hake, S. L., Adhane, M. K., Gadilkar, R. V, Gaikwad, D. R., & Wagaskar, V. V. (2016). ***Effect of Molarity on Geopolymer Concrete***. May, 232–236.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). ***Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete***. *Research Report GC*, 94.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). ***On the development of fly ash-based geopolymer concrete***. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.

- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). *Use of geopolymers concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure*. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704–728.
- Hosan, A., Haque, S., & Shaikh, F. (2016). *Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study*. *Journal of Building Engineering*, 8(October 2015), 123–130.
- Hussin, M. W., Bhutta, M. A. R., Azreen, M., Ramadhansyah, P. J., & Mirza, J. (2015). *Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(3), 709–720.
- Ishak, S., Lee, H. S., Singh, J. K., Ariffin, M. A. M., Lim, N. H. A. S., & Yang, H. M. (2019). *Performance of fly ash geopolymer concrete incorporating bamboo ash at elevated temperature*. *Materials*, 12(20), 1–17.
- Joseph, B. (2015). *Behaviour of Geopolymer Concrete Exposed To Elevated Temperatures*, Doktora Tezi, Cochin University Of Science And Technology, 162.
- Joseph, B., & Mathew, G. (2012). *Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete*. *Scientia Iranica*, 19(5), 1188–1194.
- Junaid, M. T., Khennane, A., & Kayali, O. (2015). *Performance of fly ash based geopolymer concrete made using non-pelletized fly ash aggregates after exposure to high temperatures*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(10), 3357–3365.
- Kantarci, F., Türkmen, İ., & Ekinici, E. (2021). *Improving elevated temperature performance of geopolymer concrete utilizing nano-silica, micro-silica and styrene-butadiene latex*. *Construction and Building Materials*, 286, 122980.
- Karaaslan, C., ve Yener, E. (2021). *The Effect of Alkaline Activator Components on the Properties of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer*. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 1255–1269.

- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T. Y. (2017). ***LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree***. *Advances in Neural Information Processing Systems, 2017-Decem(Nips)*, 3147–3155.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). ***Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review***. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729–746.
- Khan, M. N. N., & Sarker, P. K. (2020). ***Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar***. *Construction and Building Materials*, 263, 120177.
- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2010). ***Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete***. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 334–339.
- Lahoti, M., Wong, K. K., Yang, E. H., & Tan, K. H. (2018). ***Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature***. *Ceramics International*, 44(5), 5726–5734.
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). ***A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements***. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341–1349.
- Li, Y. L., Zhao, X. L., Singh Raman, R. K., & Al-Saadi, S. (2018). ***Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand***. *Construction and Building Materials*, 159, 704–724.
- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2018). ***Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete***. *Journal of Building Engineering*, 19(May), 420–428.

- Mallikarjuna Rao, G., Gunneswara Rao, T. D., Siva Nagi Reddy, M., & Rama Seshu, D. (2019). *A Study on the Strength and Performance of Geopolymer Concrete Subjected to Elevated Temperatures*. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 11, 869–889.
- Mathew, G., & Joseph, B. (2018). *Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures*. *Journal of Building Engineering*, 15, 311–317.
- McNulty, E. (2009). *Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement*. Department of Chemistry, The Catholic University of America, 1-22.
- Mohammad, S. H., Gülşan, M. E., & Çevik, A. (2022). *Behaviour of Geopolymer Concrete Two-Way Slabs Reinforced by FRP Bars After Exposure to Elevated Temperatures*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 12399–12421.
- Moradikhou, A. B., Esparham, A., & Jamshidi Avanaki, M. (2020). *Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete*. *Construction and Building Materials*, 251, 118965.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Abdulkareem, O. A., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., Rafiza, A. R., Zarina, Y., & Alida, A. (2013). *Microstructure studies on the effect of the alkaline activators of fly ash-based geopolymer at elevated heat treatment temperature*. *Applied Mechanics and Materials*, 421, 342–348.
- Nazari, A., Bagheri, A., Sanjayan, J. G., Dao, M., Mallawa, C., Zannis, P., & Zumbo, S. (2019). *Thermal shock reactions of Ordinary Portland cement and geopolymer concrete: Microstructural and mechanical investigation*. *Construction and Building Materials*, 196, 492–498.
- Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2014). *Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer*. *Materials and Design*, 57, 667–672.

- Niş, A. (2019). *Compressive strength variation of alkali activated fly ash/slag concrete with different NaOH concentrations and sodium silicate to sodium hydroxide ratios*. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 4(2), 351–360.
- Niveditha, M., & Koniki, S. (2020). *Effect of Durability properties on Geopolymer concrete – A Review*. *E3S Web of Conferences*, 184, 01092.
- Oyebisi, S., Ede, A., Ofuyatan, O., Oluwafemi, J., & Olutoge, F. (2018). *Modeling of hydrogen potential and compressive strength of geopolymer concrete*. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 671–679.
- Özge, T. (2020). **Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Yangın Dayanımına Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisinin Araştırılması**. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya. 93.
- Öztemel E., P. D. E. (2012). *Yapay sinir ağları*. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., vd. (2011). *Scikit-learn: machine learning in python*. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Pan, Z., Sanjayan, J. G., & Kong, D. L. Y. (2012). *Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures*. *Construction and Building Materials*, 36, 365–372.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (Eds.). (2013). *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM* (Vol. 13). Springer Science & Business Media, 125-144.
- Rachmansyah, Hardjasaputra, H., & Cornelia, M. (2019). *Experimental study of effect additional water on high performance geopolymer concrete*. *MATEC Web of Conferences*, 270, 01004.
- Rahmadina, A., & Ekaputri, J. J. (2017). *Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Exposed to Combustion*. *MATEC Web of Conferences*, 138, 01022.

- Rahmati, M., & Toufigh, V. (2022). *Evaluation of geopolymer concrete at high temperatures: An experimental study using machine learning*. Journal of Cleaner Production, 372(June), 133608.
- Razak, S. N. A., Shafiq, N., Guillaumat, L., Wahab, M. M. A., Farhan, S. A., Husna, N., & Ismail, F. I. (2021). *Fire Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Effect of Burning Temperature*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 945(1), 012062.
- Rickard, W. D. A., Gluth, G. J. G., & Pistol, K. (2016). *In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates*. Cement and Concrete Research, 80, 33–43.
- Rovnaník, P. (2010). *Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer*. Construction and Building Materials, 24(7), 1176–1183.
- Roy, D. M. (1999). *Alkali-activated cements Opportunities and challenges*. Cement and Concrete Research, 29, 249–254.
- Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2012). *Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates*. Cement and Concrete Research, 42(9), 1242–1251.
- Samarakoon, M. H., Ranjith, P. G., Rathnaweera, T. D., & Perera, M. S. A. (2019). *Recent advances in alkaline cement binders: A review*. Journal of Cleaner Production, 227, 70–87.
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). *Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete*. Materials & Design, 63, 584–592.
- Shaikh, F. U. A., & Vimonsatit, V. (2015). *Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete at elevated temperatures*. Fire and Materials, 39(2), 174–188.

- Shalev-Shwartz, S., & Ben-David, S. (2014). *In Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms* (Vol.9781107057). Cambridge University Press, 397.
- Sundberg, C. (2018). *An Investigation of Geopolymers for Use in High Temperature Applications*, Doktora Tezi, University of Minnesota, Minnesota, 201.
- Tanyildizi, H., & Yonar, Y. (2016). *Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature*. *Construction and Building Materials*, 126, 381–387.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). *Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution*. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 36–40.
- Triwulan, Wigestika, P., & Ekaputri, J. J. (2016). *Addition of superplasticizer on geopolymer concrete*. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(24), 14456–14462.
- Türkmen, İ., Karakoç, M. B., Kantarcı, F., Maraş, M. M., & Demirboğa, R. (2016). *Fire resistance of geopolymer concrete produced from Elazığ ferrochrome slag*. *Fire and Materials*, 40(6), 836–847.
- Uysal, A. (2004). *Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 152.
- Valencia Saavedra, W. G., & Mejía de Gutiérrez, R. (2017). *Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures*. *Construction and Building Materials*, 154, 229–235.
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). *Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1–3), 1–6.

- Wang, Q., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Mohamed, A., & Vatin, N. I. (2022). *Application of Soft Computing Techniques to Predict the Strength of Geopolymer Composites*. *Polymers*, 14(6), 1074.
- Xiem Nguyen Thang. (2016). *Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar*. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 5(2), 49–52.
- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016). *Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete*. *Materials Science Forum*, 841(March), 162–169.
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., & Shi, X. (2020). *Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength*. *Construction and Building Materials*, 262, 120924.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Cao, L., & Qi, S. L. (2014). *Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications*. *Procedia Engineering*, 71, 153–158.
- Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., & Yuan, Z. S. (2020). *Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure*. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103483.
- Zhao, J., Wang, K., Wang, S., Wang, Z., Yang, Z., Shumuye, E. D., & Gong, X. (2021). *Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Mortar and Paste Cured at Room Temperature*. *Polymers*, 13(9), 1473.
- Zhao, Q., Ye, Z., Su, Y., & Ouyang, D. (2019). *Predicting complexation performance between cyclodextrins and guest molecules by integrated machine learning and molecular modeling techniques*. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 9(6), 1241–1252.

EKLER

Ek 1 Çalışmada kullanılan veri seti (3 bölüme ayrılarak verilmiştir. 10x322 + 10x322 + 10x322, toplam 30x322. İlk bölüm 1-24 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agrega boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	3.80	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	10.00	0.75	0.40	2.50	50.00	28.00	20.00	1.00	900.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	3.80	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 25-49 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agreg boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
14.00	20.00	0.74	0.40	2.50	22.32	26.00	90.00	2.00	800.00
13.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	3.80	27.00	100.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	0.00	28.00	28.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 50-74 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
8.00	20.00	0.74	0.54	2.00	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	0.00	28.00	28.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.74	0.40	2.50	22.32	26.00	90.00	2.00	800.00
16.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 75-99 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agreg boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
12.00	12.00	0.67	0.50	2.50	32.00	28.00	25.00	2.00	650.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
16.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	3.80	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 100-124 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
10.00	16.00	0.71	0.75	3.60	63.00	28.00	25.00	1.00	700.00
14.00	10.00	0.75	0.40	2.50	50.00	28.00	20.00	1.00	900.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
8.00	20.00	0.74	0.54	2.00	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 125-149 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
14.00	20.00	0.74	0.40	2.50	22.32	26.00	90.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.71	0.75	3.60	63.00	28.00	25.00	1.00	700.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
8.00	20.00	0.74	0.54	2.00	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
13.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 150-174 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	0.00	28.00	28.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
10.00	10.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	19.00	0.65	0.58	5.50	0.00	28.00	25.00	2.00	1100.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
13.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.71	0.75	3.60	63.00	28.00	25.00	1.00	700.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 175-199 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
14.00	20.00	0.74	0.40	2.50	22.32	26.00	90.00	2.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
13.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
16.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 200-224 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agrega boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
8.00	20.00	0.74	0.54	2.00	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
10.00	16.00	0.71	0.75	3.60	63.00	28.00	25.00	1.00	700.00
12.00	12.00	0.67	0.50	2.50	32.00	28.00	25.00	2.00	650.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 225-249 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
13.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	10.00	0.75	0.40	2.50	50.00	28.00	20.00	1.00	900.00
16.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.74	0.50	0.00	0.00	28.00	25.00	1.00	750.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 250-274 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agrega boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	3.80	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
12.00	12.00	0.67	0.50	2.50	32.00	28.00	25.00	2.00	650.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	14.30	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	0.00	28.00	28.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	16.00	0.71	0.75	3.60	63.00	28.00	25.00	1.00	700.00
14.00	10.00	0.75	0.40	2.50	50.00	28.00	20.00	1.00	900.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	0.00	28.00	28.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 275-299 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agregat boyutu (mm)	Agregat içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
12.00	12.00	0.67	0.50	2.50	32.00	28.00	25.00	2.00	650.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.79	0.55	2.50	0.00	27.00	100.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
8.00	20.00	0.74	0.54	2.00	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.74	0.40	2.50	22.32	26.00	90.00	2.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
12.00	8.00	0.61	0.60	0.00	0.00	25.00	90.00	1.00	700.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 300-324 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agrega boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat-Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	16.00	0.65	1.00	1.00	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	10.00	0.75	0.40	2.50	50.00	28.00	20.00	1.00	900.00
16.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	2.00	800.00
10.00	8.00	0.71	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	10.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
14.00	20.00	0.75	0.40	2.50	56.50	28.00	20.00	3.00	800.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00
10.00	15.00	0.76	0.45	2.00	180.00	28.00	25.00	1.50	1000.00
10.00	20.00	0.77	0.35	2.50	0.00	27.00	60.00	1.00	800.00

Ek 1 Devam (İlk bölüm, 325-332 arası satırlar)

Molarite (M)	Maksimum agrega boyutu (mm)	Agrega içeriği (%)	Alkali aktivatör/Bağlayıcı	Alkali silikat- Alkali hidroksit	Su ilavesi (kg/m ³)	Kür süresi (Gün)	Kür sıcaklığı (°C)	Yangın deneyi süresi (Saat)	Maksimum yangın deneyi sıcaklığı (°C)
10.00	10.00	0.61	0.40	2.50	68.13	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
4.00	20.00	0.76	0.40	2.50	0.00	28.00	25.00	1.00	800.00
10.00	8.00	0.70	0.58	16.40	33.20	28.00	23.00	1.00	800.00
14.00	20.00	0.76	0.35	2.50	20.00	27.00	60.00	2.50	1000.00
15.00	8.00	0.73	0.60	2.50	0.00	25.00	75.00	1.00	700.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 1-26 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
900.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
900.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
650.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 27-52 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
28.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 53-78 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
28.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 79-104 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
550.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
28.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 105-130 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
27.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 131-156 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 157-182 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 183-208 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 209-234 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
200.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
350.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 235-260 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
450.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 261-286 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
650.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 287-312 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (İkinci bölüm, 313-332 arası satırlar)

Sıcaklık (°C)	Bağlayıcı BA	Bağlayıcı FA	Bağlayıcı FA+Alcoffin	Bağlayıcı FA+BA	Bağlayıcı FA+GGBS	Bağlayıcı GGBS	Bağlayıcı MK+FA	Bağlayıcı VT	Alkali aktivatör K ₂ SiO ₃ -KOH
300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
650.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 1-24 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	5.48
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	30.82
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	19.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	28.20
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	17.19
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	11.18
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	37.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	18.72
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	36.65
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	24.86
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	19.30
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	26.70
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	29.50
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	39.05
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	38.51
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	23.80
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	53.00
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	42.52
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	37.33
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	62.22
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	10.70
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	51.00
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.30

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 25-49 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	32.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	42.62
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	4.04
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.94
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	61.14
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	58.99
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	27.97
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	42.52
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	5.72
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	38.11
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	20.31
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	28.80
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	48.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	6.37
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	14.80
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	42.79
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	60.50
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	21.26
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	57.18
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	63.63
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	50.77
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	59.73

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 50-74 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	55.54
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	41.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	43.08
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	13.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	59.73
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	51.34
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	53.53
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	18.34
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	6.44
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	57.47
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	41.64
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	9.35
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	57.30
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.12
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	52.69
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	24.16
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.30
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	14.15
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.78
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	49.64
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	44.11
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	68.11
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	28.30
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	24.89

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 75-99 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	41.37
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	26.40
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	25.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	51.34
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	48.14
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	6.20
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	6.20
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	43.10
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.12
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	9.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	49.80
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	62.57
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	18.27
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	48.23
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	49.85
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	35.85
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	59.73
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	58.89
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.70
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	17.74
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	57.30
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	23.24
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	47.77

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 100-124 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	22.15
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	56.50
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	23.98
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	66.00
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	4.29
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	24.68
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	13.20
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	62.57
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	36.38
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	42.14
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	53.70
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	63.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	39.50
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	23.41
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	13.03
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	40.30
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	18.19
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.51
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	55.26
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	15.84
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	18.16
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.83
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	34.83
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	50.34

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 125-149 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	15.67
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	16.81
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	26.68
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	39.00
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	30.80
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	12.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	20.38
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	16.69
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	31.90
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.95
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	30.82
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	9.46
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	27.56
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	47.52
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	32.88
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	14.30
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	26.20
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	64.11
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	24.81
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	55.47
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	51.75
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	56.90
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	60.57
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.92

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 150-174 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	26.74
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	36.19
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	28.59
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	58.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	32.13
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	7.92
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	8.45
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	46.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	52.65
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	34.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	26.50
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	44.20
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	57.31
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	14.30
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	30.56
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	25.46
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	55.40
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	37.33
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	22.20
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	38.58
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	60.31
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	32.90
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	44.50
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	20.25
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	55.47

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 175-199 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	17.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	42.72
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	43.50
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	20.46
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	23.34
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	8.06
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.74
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.40
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	28.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	32.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.70
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.50
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	53.73
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	37.11
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	18.94
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	47.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.64
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.65
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	64.11
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	21.80
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.73
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	39.86
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	52.43
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	25.90

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 200-224 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	38.50
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	63.63
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	58.41
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	54.42
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	58.01
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	60.57
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	44.40
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	56.85
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	34.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	49.50
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	31.53
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	35.27
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	10.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.54
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	53.30
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	51.76
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	14.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.08
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	64.23
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	5.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	6.58
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	16.46
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	48.82
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	21.57

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 225-249 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	44.12
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.85
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	31.50
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	51.25
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	52.90
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.64
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	35.56
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	36.73
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	30.54
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	43.13
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	19.33
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.06
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	36.47
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.47
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	33.34
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	40.30
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	12.20
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	60.57
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	10.54
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	60.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.43
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	23.69
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	41.69
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	26.19
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 250-274 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	12.50
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	32.88
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	64.11
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	15.45
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	54.52
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.37
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	35.55
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	6.83
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	13.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	3.44
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	45.52
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	40.40
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	52.31
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	22.01
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	22.06
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	34.91
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.79
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	63.63
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	29.15
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	22.40
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	24.72
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	43.10

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 275-299 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	57.75
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	55.23
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	21.92
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	27.84
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	41.72
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	7.90
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	15.37
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	52.79
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	15.20
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	37.89
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	39.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	46.32
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	40.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	54.15
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	15.09
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	39.50
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	22.10
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	49.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	56.68
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	14.78
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	10.05

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 300-324 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	28.91
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	38.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	33.26
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	16.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	31.87
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	17.30
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	62.57
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	17.50
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	13.30
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	19.37
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	28.45
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	54.97
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	51.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	20.65
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	33.20
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	19.40
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	50.83
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	14.10
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	27.80
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	43.37
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	22.69
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	45.05

Ek 1 Devam (Üçüncü bölüm, 325-332 arası satırlar)

Alkali aktivatör Na ₂ SiO ₃ -NaOH	Alkali aktivatör NaOH	Kür şekli laboratuvar	Kür şekli ısıtma	Kür şekli buhar	Kür şekli su	Soğutma şekli fırın	Soğutma şekli laboratuvar	Soğutma şekli su	Kalan basınç dayanımı (MPa)
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	37.72
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	33.22
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	52.40
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	55.57
1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	15.60
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	57.69
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	34.86
1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.08