

**HAVAALANI KAZALARINA KARŞI YUMUŞAK ZEMİN UYGULAMASI OLARAK
GEOPOLİMER MALZEMENİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hazırlayan: Adem KUMCU

Danışman: Prof. Dr. Engin YENER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

İĞDIR/2023

Her Hakkı Saklıdır

**T.C.
IĞDIR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAVAALANI KAZALARINA KARŞI YUMUŞAK ZEMİN UYGULAMASI
OLARAK GEOPOLİMER MALZEMENİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Adem KUMCU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM 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.

Adem KUMCU

ÖZET

HAVAALANI KAZALARINA KARŞI YUMUŞAK ZEMİN UYGULAMASI OLARAK GEOPOLİMER MALZEMENİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

KUMCU, Adem

Yüksek Lisans Tezi,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin YENER

Mart 2023,79 sayfa

Belirli mesafelerde en güvenli ve hızlı ulaştırma yöntemi olan havayolu ulaşımında uçakların inişi ve kalkışı sırasında yaşanan pistten aşma kazalarında can ve mal kaybını önlemek için çalışmalar yapılmaktadır. Pistten aşma kazalarını önlemek için pist sonlarına Yumuşak Zemin ile Durdurma Sistemi (Soft Ground Arresting System, SGAS) kurulması yöntemiyle bu kazalardaki can ve mal kaybının önlenebileceği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Bu minvalde pist sonlarına eklenecek sistemin suya, don tesirine, buz çözücü tuzların etkisine dayanıklı olma, bünyesine hayvan ve böcekleri çekmeme, bitki gelişimini önleme, kıvılcım saçmama, uzun ömürlü olma, optimum mukavemet değerlerini sağlama ve yeterli yoğunluk değerine sahip olma gibi özellikleri sağlaması gerektiği önerilmiştir. Öneri üzerine çalışmalar yapılarak standartları karşılayan EMAS (Engineered Material Arresting System) adı verilen ticari bir sistem üretilerek günümüzde 69 havaalanında 117 pist sonunda kullanılmaktadır. EMAS pistten aşma kazalarını önlemede yüksek başarıya sahiptir. Yapılan literatür taramalarında EMAS'ın çimento bazlı hafif bir betondan üretildiği bilinmekte olup bu amaçla üretilen betonların yoğunluk olarak 600 kg m^{-3} den daha az, 0,35-1 MPa aralığında basınç mukavemetine sahip olması gerektiği tespit edilmiştir. Halihazırda kullanılan EMAS ürününün tek sağlayıcısının olması, maliyet ve bakım masraflarının fazla olması nedeniyle alternatif SGAS ihtiyacı olduğu bilinmektedir. FAA' nın belirlemiş olduğu standartları geopolimer hafif malzemenin karşılayabileceği düşünülerek belirli oranlarda Silis Dumanı, Uçucu Kül, Alüminat Çimentosu karışımını Sodyum Hidroksit ve Sodyum Silikat bazlı Alkali ile aktiveleştirip uygun oranda HidrojenPeroksit (HP) ve Köpük Ajanı (KÖA) kullanarak Geopolimer esaslı bir SGAS üretmek hedeflenmiştir. Üç farklı oranda KÖA (%0, %1, %2) ve dört farklı oranda (%0, %0,5, %1, %1,5) HP kullanılarak 12 grup geopolimer malzeme üretilerek basınç mukavemeti, yoğunluk, su emme ve boşluk oranı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda KÖA%1HP%1 oranına sahip karışımın, basınç mukavemeti 0,37 MPa, yoğunluk değeri $306,20 \text{ kg m}^{-3}$, KÖA%2HP%1 oranına sahip karışımın basınç mukavemeti 0,45 MPa, yoğunluk değeri $275,77 \text{ kg m}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bu bulgulardan yola çıkarak KÖA%1 HP%1 (K8) ve KÖA%2 HP%1 (K9) oranına sahip geopolimer hafif karışımların SGAS için uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: EMAS, Geopolimer, Hafif Beton, Pistten Aşma, Uçak Kazası, Yumuşak Zemin Tutucu Sistem (SGAS)

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF GEOPOLYMER MATERIAL AS A SOFT GROUND APPLICATION AGAINST AIRPORT ACCIDENTS

KUMCU, Adem

Master's Thesis,

Department of Civil Engineering

Thesis Adviser: Prof. Dr. Engin YENER

March 2023, 79 pages

Air travel is the safest and fastest mode of transportation over long distances, but accidents can occur during takeoff and landing when planes overrun the runway. In the United States, the Federal Aviation Administration (FAA) has researched ways to prevent such accidents and has concluded that the Soft Ground Arresting System (SGAS) can be installed at the ends of runways to prevent loss of life and property. The system must be resistant to water, deicing salt, and the effects of frost, must not attract animals and insects, must prevent plant growth, must not produce sparks, must have a long lifespan, must have adequate strength, and must have the right density. Based on these recommendations, a system called EMAS was developed and is now used at 117 runway ends at 69 airports. EMAS has a high success rate in preventing runway overrun accidents. Literature review showed that EMAS is made of a lightweight concrete based on cement, with a density less 600 kg m^{-3} and a compressive strength of 0,35-1 MPa. It is known that there is a need for alternative SGAS due to the fact that it is the only provider of the EMAS product currently used and the high cost and maintenance costs. Considering that geopolymer lightweight concrete can meet the standards determined by the FAA, it is aimed to activate the mixture of Silica Fume, Fly Ash, Aluminate Cement with Sodium Hydroxide and Sodium Silicate-based Alkali in certain proportions and to produce a Geopolymer-based SGAS by using Hydrogen Peroxide (HP) and Foaming Agent (KÖA) in the appropriate ratio. Compressive strength, density, water absorption and void ratio experiments were performed by producing 12 groups of geopolymer concrete using three different rates of KÖA (0%, 1%, 2%) and four different rates of HP (0%, 0.5%, 1%, 1.5%). As a result of the experiments, the compressive strength of the mixture with KÖA%1HP%1 ratio was found to be 0.37 MPa, the density value was found to be 306.20 kg m^{-3} , the compressive strength of the mixture with KÖA%2HP%1 ratio was found to be 0.45 MPa, and the density value was found to be 275.77 kg m^{-3} . Based on these findings, it was concluded that geopolymer lightweight concrete mixtures with KÖA%1 HP%1 (K8) and KÖA%2 HP%1 (K9) ratio may be suitable for SGAS.

KeyWords: Airplane Crash, EMAS, Geopolymer, Lightweight Concrete, Runway Excursion, Runway Overruns, Soft Arrestor Systems (SGAS)

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde, deneylerde kullanılacak materyallerin belirlenmesi ve temininde, deneysel çalışmaların yapılmasında, sonuçlarının değerlendirilmesinde, tezin yazılmasında ayrıca karşılaştığım her türlü engelleri aşmamda desteğini gördüğüm danışman hocam sayın Prof. Dr. Engin YENER' e,

Iğdır Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında deneylerimde kullandığım bazı materyallerin sahibi olan ve kullanmama izin veren Dr. Öğr. Üye. Cemal KARAASLAN' a

Iğdır' da bulunduğum zamanlarda barınma imkanlarımı sağlayan Nur BULUT ve Öğr. Gör. Caner BULUT' a,

Halen aktif olarak çalışmış olduğum Van Tuşba Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğünde Yüksek Lisans eğitimim için gerektiğinde izin veren ve bu süreçte yerime çalışan çalışma arkadaşlarıma,

Sonu belli olmayan bir yoldan alıp mühendis olmamı sağlayan, hayatım boyunca maddi manevi destek gördüğüm hayat mimarım babam Van Tarım İl Müdür Yardımcısı Ali KUMCU ve dualarından güç aldığım annem Emine KUMCU' ya,

Son olarak Yüksek Lisans eğitimim boyunca ümitsiz olduğum zamanlarda teşvik eden ve destek olan, çalışmalarımın dolaylı çoğu zaman yalnız bıraktığım eşim Nazlı KUMCU ve biricik kızım Mercan Esila KUMCU' ya

Teşekkür Ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Karayolu ile Yapılan Ulaşım	1
1.2. Demiryolu ile Yapılan Ulaşım	4
1.3. Denizyolu ile Yapılan Ulaşım	5
1.4. Havayolu ile Yapılan Ulaşım	6
1.5. EMAS (Engineered Materials Arresting System)	12
1.6. Geopolimer Beton	20
2. LİTERATÜR TARAMASI	22
2.1. Emas	22
2.2. Geopolimer Beton	24
2.3. Hafif Beton	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1 Materyal.....	29
3.1.1. Su	29
3.1.2. Uçucu kül.....	30
3.1.3. Silis Dumanı	32
3.1.4. Kalsiyum alüminat çimentosu	33
3.1.5. Sodyum Silikat (SS) $\text{Na}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$	34
3.1.6.Sodyum Hidroksit (SH) NaOH.....	35
3.1.7. Köpük Ajanı.....	36
3.1.8.Hidrojen Peroksit	38

3.2. Yöntem	38
3.2.1.Basınç Dayanımı Deneyi ile Mukavemet Ölçümü	45
3.2.2. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini	46
3.2.3. Yoğunluk Tayini	48
3.2.4. Durabilite Tayini.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Boşluk ve Su Emilimi Oranlarının Belirlenmesi.....	51
4.2. Karışım Yoğunluklarının Belirlenmesi	59
4.3. Basınç Mukavemeti.....	63
4.4 Durabilite Özellikleri.....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
5.1. Sonuçlar.....	70
5.2. Öneriler.....	73
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APM	(Analytical Prediction Model) Analitik Tahmin Modeli
ARFF	(Aircraft Rescue and Fire Fighting) Uçak kurtarma ve Yangınla Mücadele
DKY	Doygun Kuru Yüzey
EMAS	(Engineered Material Arresting System) Tasarlanmış Materyallerle Durdurma Sistemi
FAA	(Federal Aviation Administration) Federal Havacılık İdaresi
GP	Geopolimer
HP	Hidrojen Peroksit
ICAO	(International Civil Aviation Organization) Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
KAÇ	Kalsiyum Alüminat Çimentosu
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KÖA	Köpük Ajanı
NTSB	(The National Transportation Safety Board) Ulusal Ulaşım Güvenliği Kurulu
RE	(Runway Excursions) Uçağın Pisten Çıkması veya Aşması
RSA	(Runway Safety Area) Pist Güvenlik Alanı
SD	Silis Dumanı
SGAS	(Soft Ground Arrestor System) Yumuşak Zemin Tutucu Sistemi
SH	Sodyum Hidroksit
SS	Sodyum Silikat
TS	Türk Standartları
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UK	Uçucu Kül

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.İstanbul’da karayolu ulaşımı	2
Şekil 1.2. 2002-2021 Yılları arasında Türkiye karayollarında yaşanan trafik kaza sayıları	2
Şekil 1.3. Pozantı Tarsus arasında bulunan kaçış rampası.....	3
Şekil 1.4. Viyadük üzerinde kara tren.....	4
Şekil 1.5. Van Gölü Ekspresi vapur iskelesinde	5
Şekil 1.6. İstanbul Boğazı deniz trafiği.....	6
Şekil 1.7. Türk Hava Yollarına ait bir uçağın gökyüzüne doğru kalkışı	6
Şekil 1.8.Türkiye’de 2008-2021 yılları arasında iç ve dış hatlara seyahat eden yolcu sayısı	7
Şekil 1.9. Uçak kazalarına neden olan etmenler	8
Şekil 1.10. Havaalanlarında tipik trafik alanları	9
Şekil 1.11. Uçakların havaalanında iniş ve kalkış esnasında kullandığı alanlar	9
Şekil 1.12. Pistten aşma sonucunda akarsuya düşen bir uçak	11
Şekil 1.13. Pist sonlarına eklenmesi istenen güvenlik alanı	12
Şekil 1.14.EMAS’ a ait kesitler	13
Şekil 1.15. EMAS yatağı	14
Şekil 1.16. John F. Kennedy Uluslararası Havaalanındaki uçak kazası	15
Şekil 1.17. EMAS tarafından durdurulan bir uçak	16
Şekil 1.18.EMAS yatağına giren uçaklara ait resimler.....	16
Şekil 3.1. GFL markalı cihazdan alınan saf su	29
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külü.....	31
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan silis dumanı	32
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan Kalsiyum alüminat çimentosu	34
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan katı SH	36
Şekil 3.6.Deneylerde kullanılan KÖA	37
Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan HP	38
Şekil 3.8.Deneylerde kullanılan terazi.	40
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan sıvı SS ve 10 M SH çözeltisi.....	41

Şekil 3.10. Deneyisel çalışmada kullanılan 40*10*10 cm ³ kalıp	42
Şekil 3.11. Geopolimer hamur yapımında kullanılan mikser	42
Şekil 3.12. Kalıba dökülmüş taze geopolimer hamur	43
Şekil 3.13. Etüv içerisine konulan geopolimer malzeme.....	43
Şekil 3.14. Kalıptan çıkarma işlemi	44
Şekil 3.15. Etüvden çıkarılan geopolimer malzemelere ait görseller	44
Şekil 3.16. Ana malzemeden kesilerek oluşturulan küp numune	45
Şekil 3.17. Basma ve eğilme testi presini	46
Şekil 3.18. Kovada su içinde bekletilen numuneler.....	47
Şekil 3.19. Arşimet deney düzeneği	48
Şekil 3.20. Boylarını 3-5 mm aşacak kadar musluk suyu ile doldurulan kap.....	49
Şekil 3.21. Utest Metarıl Testing Equipment marka donma çözünme kabini	50
Şekil 4.1. KÖA Oranının boşluk oranına etkisi	53
Şekil 4.2. HP'nin Boşluk Oranına Etkisi	55
Şekil 4.3. KÖA oranının su emilimi oranına etkisi.....	56
Şekil 4.4. HP'in su emilim oranına etkisi	57
Şekil 4.5. Boşluk oranı ve su emilimi grafiği	58
Şekil 4.6. KÖA oranının yoğunluğa etkisi.....	60
Şekil 4.7. HP oranının yoğunluğa etkisi	61
Şekil 4.8. Boşluk oranı ve Yoğunluk dağılım grafiği	62
Şekil 4.9. KÖA oranının basınç mukavemetine etkisi.....	64
Şekil 4.10. HP oranının basınç mukavemetine etkisi	65
Şekil 4.11. Donma-çözünme etkisinde K8 ve K9 numunesinin basınç mukavemetindeki değişimi	67

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo1.1. Türkiye’de 1994-2021 yılları arasında sivil havacılıkta yaşanan kazalar	8
Tablo 1.2. Dünyada 2000-2020 yılları arasında pistten aşma kazaları	10
Tablo 1.3. Havaalanı pistinde EMAS bulunan kazalarda bazı pist aşamaları	17
Tablo 1.4. EMAS Tesislerinden bazıları	18
Tablo 3.1. Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan uçucu külün özellikleri.....	31
Tablo 3.2. Geopolimer harç üretiminde kullanılan Silis Dumanı’ nın kimyasal içeriği .	33
Tablo 3.3. Kalsiyum Alüminat Çimentosunun özellikleri	34
Tablo 3.4. Sodyum Silikat’ın fiziksel ve kimyasal özellikleri	35
Tablo 3.5. Sodyum Hidroksit’in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri	36
Tablo 3.6. Çalışmada kullanılan KÖA teknik özellikleri	37
Tablo 3.7. Deneylerde kullanılan malzemelerin oranları	39
Tablo 3.8. Toz malzemeler ve alkali sıvılarının belirlenen oranlara göre ağırlıkları	40
Tablo 3.9. 12 adet karışımın KÖA ve HP ağırlıkça oranları	41
Tablo 4.1. Etüvden çıkarılan küp numunelerin hassas ağırlık ölçümleri	51
Tablo 4.2. Arşimet terazisi ile belirlenen sudaki ağırlık ve DKY ağırlık ölçüm sonuçları	52
Tablo 4.3. Boşluk oranı ve su emilimi oranı sonuçları	52
Tablo 4.4. Küp karışımların yoğunluk hesabı	59
Tablo 4.5. Hafif geopolimer karışımların basınç mukavemet değerleri.....	63
Tablo 4.6. Donma çözünme sonrası ölçülen basınç dayanımları	66

1. GİRİŞ

Bir nesnenin ya da bir insanın bulunduğu yerden başka bir yere götürülmesine, taşınmasına ulaşım denilmektedir. Ulaşım, insan hayatının başlangıcından beri ihtiyaçlar arasında yer almıştır. Öncelikle yaya olarak başlayan bu serüven ağırlığı fazla olan malzeme ve yüklerin taşınması gibi ihtiyaçlar sonucunda bazı hayvanların evcilleştirilmesi ile karşılanmıştır. Tekerleğin icat edilmesiyle daha farklı bir boyuta geçen ulaşım teknolojik gelişmeler sonrasında karayolları ve demiryolları ile karadan, yüzen araçlar ile denizden ve uçan araçlar vasıtasıyla havadan yapılmıştır.

1.1. Karayolu ile Yapılan Ulaşım

Yeryüzünde insanlar ve hayvanların sürekli olarak kullandığı güzergâhlar düzeltilerek yollar oluşturulmuş ve uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. Karayolu ulaşımında sanayileşme sonucunda motorlu araçların kullanılmasıyla beraber bu yollar daha da geliştirilerek beton ve asfalt yollar tasarlanmıştır. Yol yapım faaliyetlerinin devletlerin asli görevlerinden olması, bu inşa faaliyetinin fazla bir bütçe gerekmeden hızlı bir şekilde yapılması ve motorlu araçların insanlar tarafından satın alınabilmesi sonucu günlük faaliyetlerden olan işe gidip gelme, gezme, seyahat etme ve taşıma işleri için karayolu ulaşımı aktif olarak kullanılmıştır. Bu sebeple kara üzerinde yapılan ulaşım dünya çapındaki en çok kullanılan tür olmuştur.

2021 yılı itibariyle ülkemizde trafiğe kayıtlı olan 25 milyonun üzerinde motorlu kara taşıtı bulunmakta olup (TÜİK, 2021), aynı zamanda 68 bin kilometre üzerinde de yol ağı bulunmaktadır (KGM, 2022).

Motorlu kara taşıtları genellikle motosikletler, otomobiller, arazi araçları, otobüsler ve kamyonlardır. Şekil 1.1’de İstanbul’da karayolu ulaşımı gösterilmiştir.



Şekil 1.1.İstanbul’da karayolu ulaşımı

Motorlu taşıt vasıtasıyla karayolu ulaşımı çok fazla tercih edilmiş olsa da en fazla kaza riski olan ulaşım şeklidir. Bu kazaların başlıca sebebi kullanıcı hatasıdır. Kullanıcı kaynaklı olan kazaların çoğu aşırı hız, alkollü veya uykulu araç kullanma sonucunda oluşmaktadır. Bu hatalar eğitim ve denetim ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Son yıllarda teknolojik ilerlemeler sonucunda sürücünün yorgun ya da alkollü olduğunu, karayolu şeritlerinden saptığını hatta takip mesafesini korumadığını kontrol eden teknolojiler ile kazalar önlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 1.2’de Türkiye’de 2002 ve 2021 yılları arasında meydana gelen trafik kazası sayıları verilmiştir.



Şekil 1.2. 2002-2021 Yılları arasında Türkiye karayollarında yaşanan trafik kaza sayıları (KGM, 2022).

Karayolu üzerinde hareket halinde olan bir araçta lastik patlaması, taşıyıcı-yönlendirici elemanlarından birinin zarar görmesi veya fren sisteminin bozulması gibi ani arızalar oluşabilmekte ve bunun sonucunda kaza oluşmaktadır. Bu tür kazalar için araç bakımlarının zamanında ve alanında yetkin kişiler tarafından yapılması kaza riskini azaltmaktadır.

Türkiye’de ağır tonajlı araçların fren boşalması sonucu en fazla kaza yaptığı yerlerden biri Pozantı-Tarsus arasında bulunan otoyol olduğu bilinmektedir. Bu yolda eğimin fazla olması nedeniyle ağır taşıtların fazlaca fren yapmaları gerektiğinden fren hidroliği ısınarak işlevsiz kalmakta bu sebeple can ve mal kaybının yaşandığı kazalar gerçekleşmektedir. Bu tür kazaları önlemek adına Şekil 1.3’te görülen Pozantı-Tarsus otoyolundaki bazı alanlara kaçış rampası dizayn edilmiştir.

Kaçış rampaları freni boşalan veya ani arıza oluşan araçların kaza yaparak can ve mal kaybına sebep olmamaları için otoyol üzerinde aşağı doğru eğimin fazla olduğu güzergâhların yol kenarlarına yapılmıştır. Acil kaçış rampası olarak adlandırılan alan; otoyol kenarından başlayıp yol güzergâhının tersine eğim ile yavaşlatarak taşıtların yol platformunda bulunan mıcıra saplanmasını ve bu sayede durmasını amaçlayan bir sistemdir.



Şekil 1.3. Pozantı Tarsus arasında bulunan kaçış rampası

Trafik kazlarının oluşmasına neden olan çevresel faktörler ise mühendislik hesaplamalarına göre hatalı dizayn edilmiş veya işaretleme eksikliği bulunan yollar ve mevsimsel faktörlerden olan kar, buz yağmur, rüzgâr gibi etmenlerdir.

1.2. Demiryolu ile Yapılan Ulaşım

Madeni bir yol üzerinden çeşitli enerji türleri ile mekanik olarak güç üreterek hareket eden, insan ya da yük taşınması yapılabilen ulaşım demiryolu ulaşımı denilmektedir. Şekil 1.4'te viyadükten geçmekte olan bir tren gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Viyadük üzerinde kara tren

Uzun mesafede kıtalar arası olan, kısa mesafede ise şehir içi ulaşımında bile kullanılabilen, toplu taşıma aracı olarak trafik yükünü azaltan bu ulaşım şekli teknolojinin gelişmesi ile modernleşip hızlarının artması sonucunda popülerliği artmıştır.

Ülkemizde Marmaray Hattı ile denizin altından tüp tüneller vasıtasıyla Asya ve Avrupa kıtaları arasında demiryolu hattı bağlantısı yapılarak Pekin'den Londra'ya kadar kesintisiz ulaşım sağlanmıştır (Özdemir, vd., 2021).

Demiryolu ulaşımı güzergâhındaki deniz, göl, dağ gibi doğal engelleri mühendislik çabaları ile aşmaktadır. Van Gölü Ekspresi tren güzergahı Marmaray projesinde tren yolunun deniz altından geçirildiği gibi Bitlis Tatvan'dan Van Tuşba'ya

göl üzerinden vapur yardımıyla geçmektedir. Bu ulaşım şekliyle karayolu taşımacılığı ve denizyolu taşımacılığı birbirine entegre olarak çalışmaktadır.



Şekil 1.5. Van Gölü Ekspresi vapur iskelesinde

1.3. Denizyolu ile Yapılan Ulaşım

Denizyolu üzerinden yapılan ulaşım türünde vapur, gemi ve bu gibi araçlar kullanılmaktadır. Kıtaları birbirinden ayıran okyanuslar ve denizler dünyanın büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu sebeple kıtalar arası ve denizlere sınırları olan ülkeler arasında yapılan ticaretlerde deniz ulaşımı kullanılmaktadır.

Ülkemizin üç tarafının denizlerle kaplı olması, Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan jeopolitik konumu nedeniyle şehirler, ülkeler ve kıtalar arası ulaşımında denizyolu ulaşımı sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiği gösterilmiştir.



Şekil 1.6. İstanbul Boğazı deniz trafiği.

1.4. Havayolu ile Yapılan Ulaşım

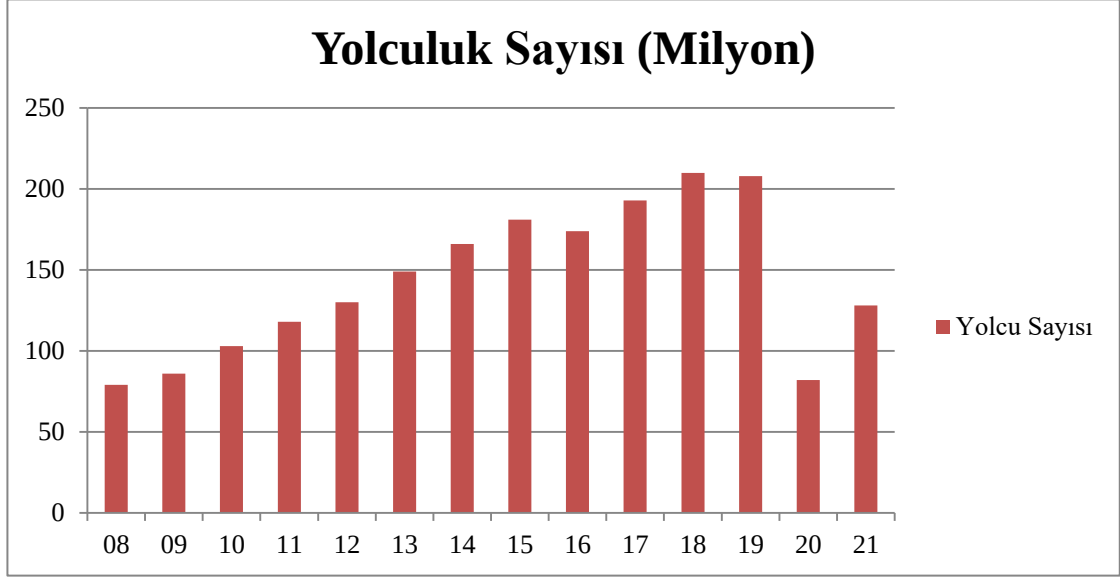
Bir alandan başka bir alana uçuş kabiliyetine sahip uçak, helikopter, uçan balon gibi mühendislik vasıtaları ile yapılan ulaşım şeklidir. Günümüzde mesafe, zaman ve güvenlik kavramının önemi sonucunda en hızlı ulaşım türü olan havayolu ulaşımı fazlaca tercih edilmektedir. Maliyetinin fazla olması nedeniyle bu ulaşım türünde lojistik faaliyetler daha az olup insan ve önemli yüklerin ulaşımında daha fazla tercih edilmektedir. Şekil 1.7’de hava yolu ulaşımı gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Türk Hava Yollarına ait bir uçağın gökyüzüne doğru kalkışı

Dünyada 2021 yılı itibariyle 41.820 adet havalimanı bulunmaktadır (CIA, 2021).

2022 tarihi itibariyle ülkemizde sivil hava trafiğine açık 57 adet havalimanı, 2021 itibariyle 558 sivil havacılıkta kullanılan uçak (SHGM, 2021) bulunmakta olup 2021 yılında ülkemizde 1 milyondan fazla uçak trafiği gerçekleşmiştir (DHMİ, 2021a).



Şekil 1.8.Türkiye’de 2008-2021 yılları arasında iç ve dış hatlara seyahat eden yolcu sayısı (DHMİ, 2021b)

Şekil 1.8’de görüldüğü gibi 2008 yılından 2019 yılına kadar seyahat eden yolcu sayısında dalgalanma olsa bile genel olarak artarak devam etmiştir. 2020 Yılında yaşanan Covid-19 pandemisi nedeniyle kısıtlamalara gidilmesi sonucunda 2008 yılındaki yolcu sayısına göre daha az kişi uçakla seyahat etmiştir. 2022 yılında bu kısıtlamaların azalmasıyla bu sayının 2018 ve 2019 yıllarından daha fazla olması öngörülmektedir.

Ülkemizde havayolu ulaşımı, ilk zamanlarda uçak sayısının az olması, çoğu ilde havaalanı bulunmaması ve maliyetli olması nedenleriyle fazla tercih edilememiştir. Son yıllarda ise bu olumsuzlukların giderilmesi ve havayolu ulaşımında konfor, güvenlik, hızlilik ve diğer ulaşım türleri ile adaptasyon gibi üst düzey hedeflerin belirlenmesi havayolu ulaşım türünün tercih sebebi olmaktadır.

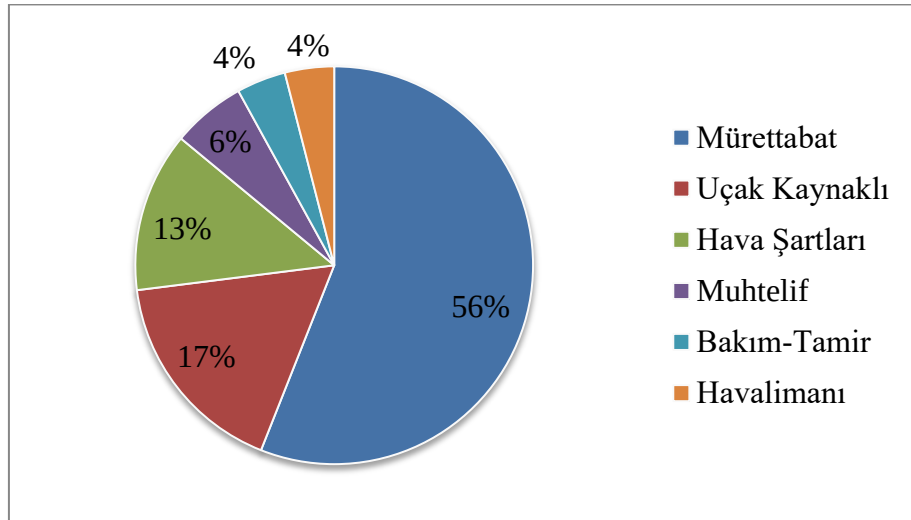
Havaalanlarının şehir içi ve şehirlerarası ana bağlantılarından olan karayolu, demiryolu hatta denizyolu gibi istasyonların yakınına kurulması ya da havaalanlarından bu noktalara ulaşımın kolay olması, ulaşım süresinin düşmesine neden olmasından

sıklıkla tercih edilmektedir. Karayolu ve deniz yolu ulaşımlarına göre daha hızlı ve daha güvenli olan havayolu ulaşımında diğer ulaşım türlerine göre az da olsa kaza riski bulunmaktadır.

Tablo1.1. Türkiye’de 1994-2021 yılları arasında sivil havacılıkta yaşanan kazalar (Vikipedi, 2021)

YIL	KAZA SAYISI	ÖLÜM SAYISI
1994	1	57
1999	1	6
2003	1	75
2007	1	57
2018	4	0
2020	3	3
2021	1	8

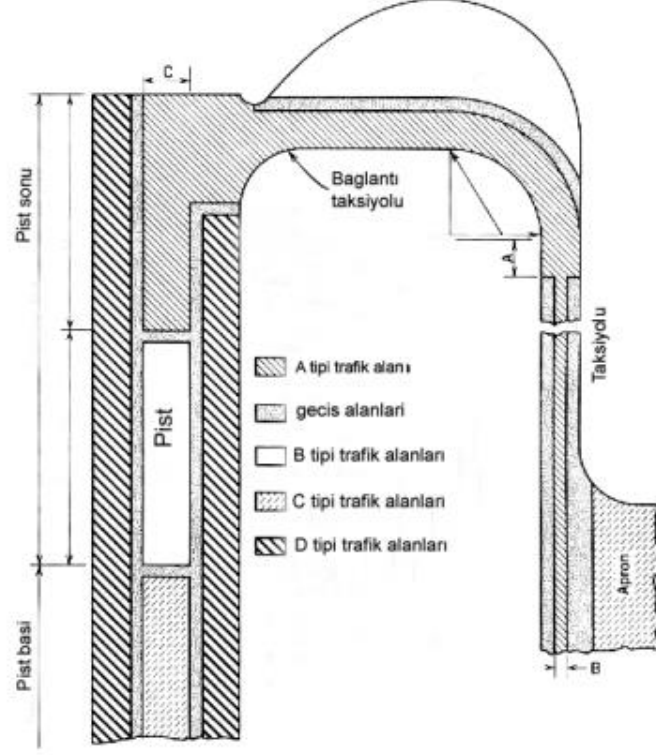
Uçak kazaları genellikle pilot hatası, uçuş esnasında oluşan ani arızalar, mevsimsel şartlara göre değişen hava koşulları, uçakların periyodik olarak bakımlarının yapılmaması ve pist tasarımında mühendislik hatalarının bulunması nedenleri ile oluşmaktadır (Tamer, 2021).



Şekil 1.9. Uçak kazalarına neden olan etmenler (1001crash, 2015)

Şekil1.9’da kaza oluşum nedenlerinden çoğunun pilot kaynaklı olduğu görülmektedir.

Yapılan araştırmalara göre, 20.563 uçak kazasının % 40 'ı uçağın piste inişi esnasında gerçekleştiği gibi, diğer kazalar ise iniş için alçalma, kalkış esnası ve gökyüzüne yükselme esnasında oluştuğu saptanmıştır (Ecer ve Ay, 2009).



şekil 1.10. Havaalanlarında tipik trafik alanları (Kök, 2008)



şekil 1.11. Uçakların havaalanında iniş ve kalkış esnasında kullandığı alanlar (Van Ferit Melen Havaalanı)

Yapılan bir araştırmada incelenen uçak kazalarının %85 i havaalanı kampüsü sınırları içerisinde uçağın iniş veya kalkış yaptığı sırada gerçekleştiği belirlenmiştir (Özkalay, 2019).

Havayolu ile ulaşım son yıllarda, en hızlı ve en güvenli ulaşım yollarından biri olarak kabul edilir. Fakat bazı pistlerin sonunda emniyet alanı bulunmaması nedeniyle, her yıl yaklaşık 10 adet pistten aşma (pistin sonunun ötesine geçilmesi) meydana gelir (Marisetty, vd., 2008).

Uçağın inişi veya kalkışı sırasında pist durumundan yada pilottan kaynaklanarak pist yüzeyinden sapması sonucu pist dışına çıkmasına, pistten aşma RE (Runway Excursion) denilmektedir (FAA, 2022).

1982'den bu yana Amerika Birleşik Devletleri havaalanlarında pisten aşma kazaları sebebiyle 23 ölüm, 300'den fazla yaralanma ve milyonlarca dolarlık uçak hasarı olmuştur (ICAO, 2005).

Tablo 1.2. Dünyada 2000-2020 yılları arasında pistten aşma kazaları (Vikipedi, 2022)

YIL	ÜLKE	OLAY
2000	Kaliforniya, ABD	Kaygan zemin nedeniyle kaza. Uçakta ağır hasar.
2004	Surakarta, Endonezya	Olumsuz hava koşulları nedeniyle kaza, 25 can kaybı
2005	Şikago, ABD	Olumsuz hava koşulları nedeniyle kaza, 1 can kaybı
2005	Toronto, Kanada	Pistten aşma sonucu 43 yaralı, uçak ise ağır hasarlı
2006	Irkutsk, Rusya	Pistten aşma sonucu 125 can kaybı.
2007	Yogyakarta, Endonezya	Pistten aşma sonucu 21 can kaybı.
2007	Sao Paulo, Brezilya	Pisten aşıp bir depoya çarpma sonucu 199 can kaybı.
2008	Jambi, Endonezya	Pisten aşıp bir eve çarpma sonucu evde bulunan 1 kişi öldü, Uçak ağır hasarlı.
2009	Kingston, Jamaika	Olumsuz hava koşulları nedeniyle 85 yaralı
2010	Mangalore, Hindistan	91 metrelik tutucu yatağı aştı, 158 can kaybı
2011	Georgetown, Guyana	Pistten aşma sonucu uçak ağır hasarlı.
2018	Trabzon, Türkiye	Pistten aşma sonucu uçak ağır hasarlı.
2020	İstanbul, Türkiye	Olumsuz hava koşulları nedeniyle kaza, 3 can kaybı
2020	Kerala, Hindistan	Pistten aşma sonucu 21 can kaybı.

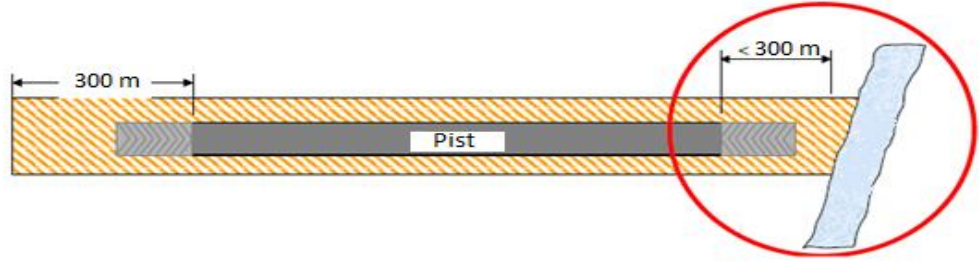
Havayolu ulaşımı en güvenli ulaşım araçlarından olsa da yaşanan kazalarda can kayıpları, yaralanma ve mal kaybına neden olmaktadır (Tablo 1.2). Yaşanan uçak kazaların birçoğunun iniş veya kalkış esnasında olması, havaalanlarında mühendislik faaliyetleri ile fiili olarak alınan önlemler neticesinde can ve mal kaybının en aza indirilmesi, mümkünse hiç olmaması için çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.12. Pistten aşma sonucunda akarsuya düşen bir uçak (FAA)

Şekil 1.12’de 28 Şubat 1984’te, İskandinav Havayoluna ait DC-10-30 uçağının John F. Kennedy (JFK) Uluslararası Havaalanı’ndan iniş yaptıktan sonra pisti aşması sonucu akarsuya düşmüştür (FAA, 2018).

Amerika’da bulunan Ulusal Ulaşım Güvenliği Kurulu (The National Transportation Safety Board, NTSB) ve Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization, ICAO) pistten aşmaları (RE) önlemek için ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirdi. Pistlerin sonuna 300 metre uzunluğunda bir Pist Güvenlik Alanı (Runway Safety Area, RSA) sağlanarak pistten aşmaların önlenebileceği sonucuna vardı. Bu çalışmadan sonra, Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration, FAA) tüm pistlerin sonuna Şekil 1.13’te gösterilen 300 metre uzunluğunda bir güvenlik alanı kurulmasını tavsiye etmiştir (FAA, 2002).



Şekil 1.13. Pist sonlarına eklenmesi istenen güvenlik alanı

Pist Güvenlik Alanı (RSA) bir uçağın pist üzerinde farklı nedenlerle duramaması veya pist sonunu aşması durumlarında kullanılması için pist sonlarına ek olarak yapıp ekstra güvenlik sunar. Pist Güvenlik Alanı uçakların ve yolcuların zarar görme riskini azaltmak ve bu tür olaylar sırasında Uçak Kurtarma ve Yangınla Mücadele (Aircraft Rescue and Fire Fighting ARFF) sırasında kolay erişilebilirlik sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

1.5. EMAS (Engineered Materials Arresting System)

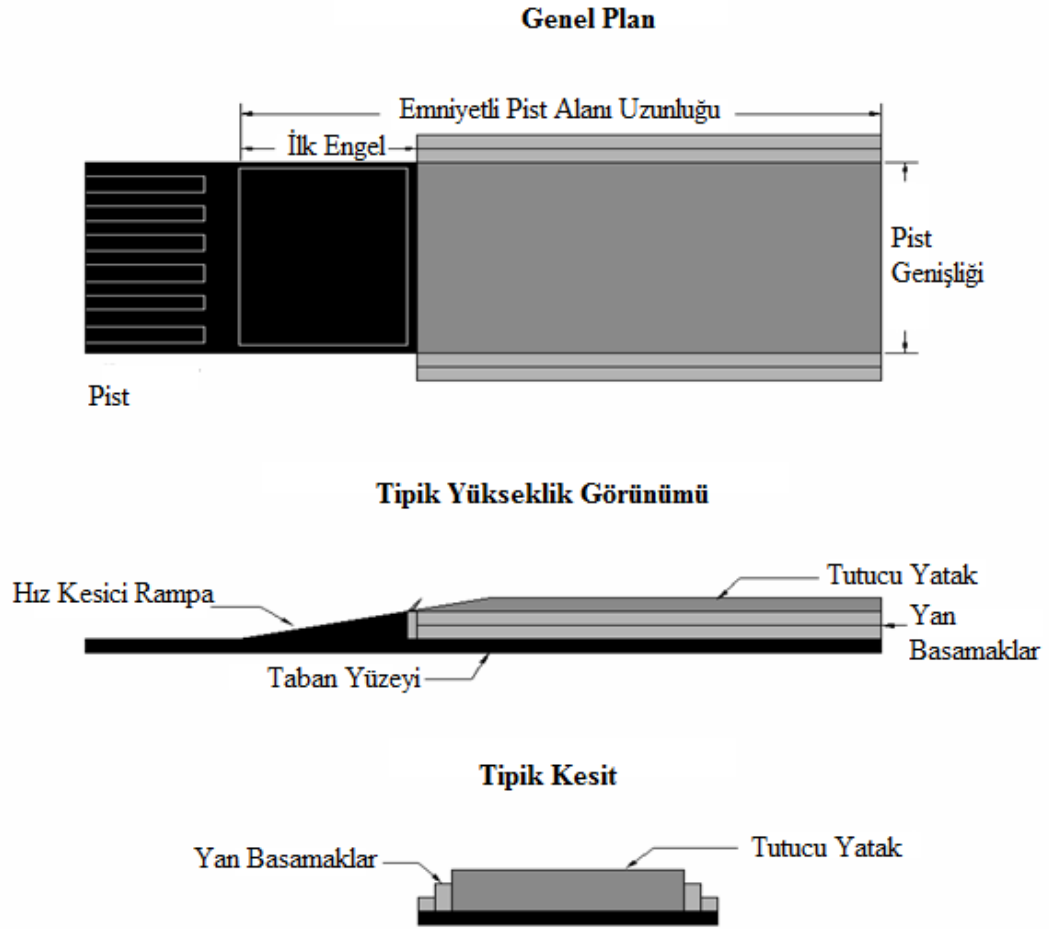
Birçok havaalanında pist sonlarına ekstra 300 metre uzunluğunda güvenlik alanını inşa etmenin önünde bazı engeller bulunmaktadır. Bu engeller otoyollar, suyuolları, yerleşim alanları, ticari veya endüstriyel kullanımlar, doğal sınırlar, hassas çevre alanları, insan yapımı inşaatlar veya doğal sınırlardır. Bu gibi durumlarda Yumuşak Zemin Tutucu Sisteminin (Soft Ground Arrestor System, SGAS) kullanılması bir çözüm olabilmektedir. SGAS, Tasarlanmış Materyallerle Durdurma Sistemi EMAS olarak da bilinmektedir.

Havaalanlarında pistten aşma kazaları için alınan geleneksel tedbirde 300 metrelik ek alana ihtiyaç vardır. Gerek bu alana sahip olmayan, gerek ekstra tedbir ihtiyacı duyulan havaalanlarında uçağın kalkış veya iniş yaptığı pistlerin uzak ucuna EMAS kurulması ile pistten aşan uçakların en az hasarı alarak ya da hiç zarar görmeden durdurulması sağlanmaktadır.

Uygun bir şekilde tasarlanmış, inşa edilmiş ve yerleştirilmiş bir EMAS, uçak yükünü taşıyan tekerlerin ağırlığı altında ezilir ve uçağı açık alandan çok daha hızlı bir şekilde yavaşlatır.

Standart bir EMAS pistten aşan bir uçağı 70 deniz mili (yaklaşık 130 km h⁻¹) ve altındaki hızlarda tamamen durdurmaktadır (FAA, 2022).

Karayolları ulaşımında ani arızalar nedeniyle oluşan kazalarda Pozantı-Tarsus arasında fazla eğimin olması ağır tonajlı araçların balata ve fren hidroliklerinin ısınmasına neden olmaktadır. Bu sebeple frenlerin işlevsiz kaldığı durumlarda otoyol kenarlarına tasarlanmış olan kaçış rampalarını kullanarak durdukları belirtilmişti. Havaalanlarında pist sonlarına eklenen EMAS Şekil 1.3 de gösterilen kaçış rampasına benzer şekilde uçakları durdurmak için tasarlanmıştır.



Şekil 1.14.EMAS' a ait kesitler (Marisetty ve diğerleri, 2008)

Pisti aşan uçak ilk olarak hız kesici rampa üzerinden geçerek tutucu yatağa girmektedir. Yatağın uzunluğu güvenlik alanının uzunluğuna göre belirlenir. Yatağın derinliği havaalanını kullanan uçağın tipine göre değişmektedir. Şekil 1.14'te EMAS' ın genel plan kesit görünümü verilmiştir.

Bu sistemin havaalanlarına kurulumu yapılırken yatağa girmeden önce uçağın yavaşlaması için ön ucuna Şekil 1. 14. de gösterilen hız kesici rampa eklenir sonrasında EMAS yatağı tasarlanır. Yatağın derinliği Şekil 1.14'de gösterildiği gibi uzak uca doğru artırılır. Bu derinlik artışı maksimum yavaşlamayı sağlar. Yan basamaklar ise yangın söndürme ve kurtarma araçlarının (ARFF) erişimini kolaylaştırmak için tutucu sistemin yanlarına inşa edilmektedir.

Şekil 1.15'te gösterilen durdurucu yumuşak kaplama, kırılabilir ön döküm hücresel beton bloklardan üretilmektedir. Genellikle 1,22x1,22 m ebatlarında prekast bloklar durdurucu sistemin ön tarafından arka tarafına doğru değişen yüksekliklerdedir ve üretimi tesiste yapıldıktan sonra montajı için yerine gönderilir (Heymsfield, 2021).



Şekil 1.15. EMAS yatağı

Bir uçak, tutucu yatağa veya EMAS' a girdiğinde, içinden geçmeye çalışırken malzemeyi ezer. Bu sırada uçağın lastikleri ile yatak malzemesi arasında bir sürtünme kuvveti ve tekerlek yuvarlanma direnci gelişir bu sayede ise uçak yavaşlar (Steyn, vd., 2016).

İlk EMAS 1996 yılında John F. Kennedy Uluslararası Havaalanı (JFK) 04R pistinde kuruldu. 1999 yılında bir SAAB 320 marka uçağın yaklaşık 130 km hızla pisti aşması ile ilk defa kullanılmış oldu. Bu pist aşması sonucunda uçakta hasar ve yolcularda herhangi bir yaralanma meydana gelmemiştir (Runwaysafe, 2022).

Şekil 1.16.'de pist aşması sonucu EMAS' ın kullanımı ile duran ilk uçağın resmi verilmiştir.



Şekil 1.16. John F. Kennedy Uluslararası Havaalanındaki uçak kazası

Şekil 1.17'de görüldüğü gibi pisti aşan bir uçağın yükü altında ezilebilecek özel bir malzemedan üretilmiş yüksek enerji soğurucu (absorbe edici) EMAS' a giren uçağın lastikleri batarak güvenli bir şekilde can ve mal kaybı olmadan durdurulmuştur.



Şekil 1.17. EMAS tarafından durdurulan bir uçak

2003 yılında 3 kişiyi taşıyan bir kargo jeti aynı tutucu yatağa girmiştir ve yine yolcularda yaralanma, uçakta ise hasar meydana gelmemiştir. Bugüne kadar EMAS 417 mürettebat ve yolcu taşıyan 17 uçağı güvenli bir şekilde durdurabilmiştir (Marisetty, 2008).



Şekil 1.18. EMAS yatağına giren uçaklara ait resimler.

EMAS, çimento malzemeli ezilebilir hafif beton bloklardan oluştuğu bilinen durdurucu bir sistemdir.

Tablo 1.3.Havaalanı pistinde EMAS bulunan kazalarda bazı pist aşamaları (FAA, 2002)

Tarih	Yolcu Sayısı	Olay
Mayıs 1999	30	Saab 340 banliyö uçağı JFK'de pisti aştı
Temmuz 2008	145	Airbus A320 ORD' da pisti aştı.
Ocak 2010	34	Bombardier CRJ-200 Charleston Y. Havaalında pisten aştı
Ekim 2011	5	Cessna Citagtion II, Key West Havaalanı batı pistinden aştı
Ekim 2016	37	Boeing 737, NY' deki LaGuardia Havalimanı'ndaki pisti aştı
Aralık 2018	117	Boeing 737, CA' daki Bob Hope Havalimanı'ndaki pisti aştı
Temmuz 2021	9	Cessna Citation Excel, Reading, PA'daki pisti aştı
Eylül 2021	2	N20GX, FL' daki Witham Field Havalimanı'ndaki pisti aştı

Ekim 2016'da içinde Cumhuriyetçi ABD Başkan Yardımcısı Adayı olan Mike Pence ile birlikte 37 kişinin bulunduğu bir Boeing 737 uçağı, LaGuardia'ya inerken pisti aştı. EMAS, uçağı güvenli bir şekilde ciddi bir hasar ve can kaybı olmadan durdurdu (Anonim, 2016).

7 Ekim 2004 ile 8 Mart 2006 tarihleri arasında meydana gelen 13 pist aşmasından yalnızca bir tanesi EMAS' ın kurulu olduğu pistte meydana gelmiştir. Bu pist aşmasında can kaybı ve uçakta herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. EMAS' ın olmadığı diğer 12 pist aşmasında ise 34 ölüm, 185 yaralanma ve 10 uçak hasarı meydana gelmiştir (Edwards, 2006). Bu veriler, EMAS' ın önemini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri'nde var olan 69 havalimanı içerisinde 117 pist sonunda EMAS bulunmaktadır. ABD' deki 2021 yılına kadar yapılan EMAS tesislerin bazılarının listesi Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4.EMAS Tesislerinden bazıları (FAA, 2022)

Havalimanı	Konumu	Sayı	Kur. Yıl		Havalimanı	Konumu	Sayı	Kur. Yıl
JFK International (JFK)	Jamaica, NY	2	1996		Cleveland Hopkins (CRE)	Cleveland, OH	2	2011
Minneapolis St. Paul (MSP)	Mineapols, MN	1	1999		Groton (GON)	Groton-New London, CT	2	2011
LittleRock (LIT)	LittleRock, AR	2	2000		AugustaState (AUG)	Augusta, ME	2	2011
Rochester International (RST)	Rochester, NY	1	2001		Elmira-Corning (ELM)	Elmira, NY	1	2012
Baton Rouge Metropolitan (BTR)	Baton Rouge, LA	1	2002		Trenton-Mercer (TTN)	Trenton, NJ	4	2012/2013
BarnstableMunicipal (HYA)	Hyannis, MA	1	2003		Burke Lakefront (BLK)	Cleveland, OH	1	2013
RoanokeRegional (ROA)	Roanoke, VA	1	2004		San Francisco (SFO)	San Francisco, CA	4	2014
Fort Lauderdale International (FLL)	Fort Lauderdale, FL	4	2004/2014		T.F. Green (PVD)	Providence, RI	3	2014/2015/2017
LaGuardia (LGA)	Flushing, NY	4	2005/2015		Addison (ADS)	Addison, TX	1	2014
Boston Logan (BOS)	Boston, MA	2	2005/2006		Chicago Executive (PWK)	Wheeling, IL	2	2014/2015
Manchester (MHT)	Manchestr, NH	1	2007		Nome (OME)	Nome, AK	1	2015
Wilkes-Barre/ScrantonIntl.(AVP)	Wilkes-Barre, PA	2	2008		LehighValley (ABE)	Allentown, PA	2	2015

Tablo 1.4 Devamı. EMAS Tesislerinden bazıları (FAA, 2022)

Havalimanı	Konumu	Sa yı	Kur. Yıl		Havalimanı	Konumu	Sayı	Kur. Yıl
San Luis Obispo (SBP)	San Luis Obispo, CA	2	2008		John Tune (JWN)	Nashville, TN	1	2015
Chicago-O'Hare (ORD)	Chicago, IL	2	2008		Kodiak (ADQ)	Kodiak, AK	2	2015
Kansas City Downtown (MKC)	Kansas City, MO	2	2009 /2010		McAllen International (MFD)	McAllen, TX	1	2015
Key West International (EYW)	Key West, FL	2	2010 /2015		Boca Raton (BCT)	Boca Raton, FL	2	2017
Arcata-Eureka (ACV)	Arcata, CA	1	2010		DeKalb/Peac htree (PDK)	Atlanta, GA	1	2018
TellurideRegional (TEX)	Telluride, CO	2	2010		Cuyahoga (CFG)	Cleveland, OH	2	2018
Martin County (SUT)	Stuart, FL	2	2011		Oxford-Waterbury (AXC)	Oxford, CT	1	2018
Lafayette (LFT)	Lafayette, LA	3	2011 /2016		Hilton Head (HHH)	Hilton Head, SC	2	2019

FAA’ nın pistten aşan uçaklar için 2012 yılında yayınladığı “EMAS’ ın planlanması, tasarımı, kurulumu ve bakımı 150/5220-22B” isimli şartnamede üretilecek EMAS ürününün;

- Suya dayanıklı olması,
- Don tesirine dayanıklı olması,
- Buz çözücü tuzların etkisine dayanıklı olması,
- Bünyesine hayvan ve böcekleri çekmemesi,
- Bünyesinde bitki gelişimini önlemesi,
- Kırılcım saçmaması,
- Yanıcı olmaması,
- Uzun ömürlü olması
- Optimum mukavemet değerlerini sağlaması,
- Yeterli yoğunluk değerine sahip olması.

gibi standartlarını taşıması gerektiği belirtilmiştir.

ABD’ de EMAS bulunan üç havalimanında yapılan incelemede mevcut EMAS' ların pistten aşan uçakları durdurmada iyi performans gösterdiğini, havaalanı yöneticileri ve mühendislerin EMAS’ ın performansından memnun olduklarını fakat malzeme ile ilgili bozulmalar ve kaplamanın soyulması gibi bakım sorunları havaalanı bakım ekipleri için zor olduğu sonucuna varılmıştır. FAA, tasarımın kullanımı için EMAS standardını belgelemesine rağmen, EMAS üreten tek bir sağlayıcı olmuş bu da maliyetli bakım giderlerine ve erişilemeyen malzeme özelliklerine neden olmaktadır. Havaalanı yetkilileri, mevcut EMAS' lar ile aynı durdurma performansına sahip ancak finansal olarak daha uygun, bakım maliyetinin daha az olduğu alternatifler aramaktadırlar (Ho and Romero, 2009).

Alternatif bir EMAS üretimi düşünüldüğünde FAA’ nın belirlemiş olduğu tüm kriterleri geopolimer malzemelerin taşıdığı düşünülmektedir.

1.6. Geopolimer Beton

Dünyada doğal olarak bulunan ya da yapay olarak üretilen puzolanik toz malzemeler alkali çözeltiler ile aktif hale getirilmesiyle üretilirler.

Puzolan olarak;

- Yüksek fırın cürufü,
- Uçucu kül,
- Volkanik kül ve metakolin gibi toz bağlayıcılar kullanılır.

Alkali aktivatörler olarak;

- Na_2SiO_3 (sodyum silikat)
- KOH (potasyum hidroksit),
- NaOH (sodyum hidroksit),
- K_2SiO_3 (potasyum silikat) gibi alkaliler kullanılmaktadır.

Geleneksel betonlarda bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılmaktadır. Geopolimer betonda ise portland çimentosu yerine doğal veya yapay puzolanlar kullanılmakta olup su yerine alkali aktivatörler tercih edilmektedir. Agreganın kullanımı ise geleneksel beton ile neredeyse aynı olup karışımın %75-80’ i agregadan ibarettir (Karaaslan, 2021).

Geopolimer betonun;

- Yangına dayanıklı olduğu(Amran, Huang, Debbarma ve Rashid, 2022; Luhar, Nicolaidis ve Luhar, 2021),
- Uygulanan donma çözünme deneylerinde tam not aldığı(Liang, Zhu, Li, Liu ve Guo, 2021; Lingyu, Dongpo, Jianing ve Hongguang, 2021),
- Sülfat dayanıklılığının çok yüksek olduğu (Bakharev, 2005),
- Çok yüksek sıcaklıklara maruz kalsa bile mekanik ve fiziksel olarak özelliklerini kaybetmediği belirlenmiştir(Şinik, 2019).

Geopolimer malzeme üretiminde laboratuvar çalışmaları yapılarak gereken yoğunlukta ve mukavemette üretim yapılarak EMAS gereksinimleri karşılanabilecektir.

Tez çalışmamda EMAS’ a alternatif olarak kullanılması için geopolimer hafif malzeme kompozisyonunun geliştirilmesi, ülkemizdeki havaalanlarında kullanılmasının yaygınlaştırılması, pistten aşma kazalarındaki can ve mal kaybının önlenmesiyle birlikte literatürdeki eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır.

Geopolimer beton genel olarak EMAS için istenen özellikleri sağlayacak nitelikte bir malzemedir. Ancak üretilecek malzemenin yoğunluğu ve mukavemeti bir uçağın konforlu bir şekilde durmasını sağlayabilmesi için tekerlek yükleri etkisiyle deforme olup büyük şekil değişimleri meydana getirmesi gerekir. Yani üretimi amaçlanan malzeme, uçak tekerlek yüklerini taşıyamayacak kadar zayıf olması gerekir. Aynı zamanda, kaza anında ilkyardım ve acil müdahale yapmaya gelen itfaiye ve ambulans araçlarının üzerinde batmadan hareket etmesini sağlayacak kadar mukavemetli olması gerekmektedir.

Bu tezde yapılacak deneysel çalışma ile optimum mukavemet ve yoğunluk özelliklerine sahip EMAS malzemesi olarak kullanılabilecek hafif geopolimer malzeme üretimi yapılması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Emas

Literatürde alternatif EMAS çalışmaları için farklı materyaller kullanılsa da asıl amaç 1000 kg m^{-3} e yakın veya daha düşük yoğunlukta, uçak iniş takımlarının lastik basıncından daha az fakat ARFF araçlarının lastik basıncından daha fazla mukavemete ve yüksek enerji emme özelliklerine sahip hafif beton üretmek olmuştur (Santagata, Bassani ve Sacchi, 2010).

Steyn vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışma, birçok havaalanında bulunan pist güvenlik alanları (RSA) Uluslararası Federal Havacılık İdaresi (FAA) standartlarını karşılamadığını, pist güvenlik alanlarında yumuşak zemin durdurma sisteminin (SGAS), alternatif bir çözüm olduğunu belirtmiştir. Bu amaçla çeşitli özelliklere sahip bir köpük beton üreterek çeşitli deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda köpük betonun özellikleri, olası bir tutucu malzeme olarak kullanılmasına uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Köpüklü betonun birim ağırlığı / yoğunluğu dikkate alınması gereken en önemli özellik olduğu ayrıca köpük betonun basınç dayanımı ve enerji emilimi özellikleri nedeniyle tutucu malzeme olarak kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir. 600 ve 800 kgm^{-3} yoğunluğa sahip köpük beton daha uygun olduğu, gerilme / deformasyon ilişkisi incelendiğinde şu anda EMAS' da kullanılan malzemeye çok benzer olduğu belirlenmiştir. Son olarak havaalanı kurtarma yangın söndürme (ARFF) araçlarının lastiklerinin büyük temas çapları, 600 kg m^{-3} gibi düşük yoğunluklarda köpüklü betona 3-5 MPa yükler altındaki davranışları olası bir EMAS için en uygun olduğunu rapor etmişlerdir (Steyn vd., 2016).

Raveendran & James (2017) tarafından yapılan çalışmada, çimento-hindistan cevizi çekirdeği ve çimento-hindistan cevizi çekirdeği-cam tozu kompozitinin SGAS olarak kullanılması için mukavemet özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre: çimento-hindistancevizi çekirdeği küplerinin yoğunluğu ve basınç dayanımı birbirleriyle doğru orantılı olduğu, Hindistan cevizi çekirdeği içeriğindeki artışla yoğunluğun azaldığı, böylece basınç dayanımı da azaldığı, çimentonun karışımına cam tozu eklendiğinde, cam tozu yüzdesindeki artışla basınç dayanımında daha fazla azalma olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, SGAS için mukavemet gereksinimini karşıladığından, bu yenilikçi malzemeler güvenlik alanlarında

SGAS olarak kullanılabilir olduğudur. Ayrıca, su emme, darbe, aşınma vb. gibi diğer gerekli parametreler tüm oranlar için de kontrol edilebilir olduğu görülmüştür (Raveendran ve James, 2017).

Youssef vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada, EMAS sisteminde yaşanan aksaklıkların giderilmesi ve böylesine önemli bir güvenlik uygulaması için ürettiği köpük beton malzeme üzerinde deneysel test sonuçları sunulmuştur. Köpük betonun ölçülen özelliklerinin (yoğunluk, basınç dayanımı ve su emme) değerlendirilmesini, hedefleyen bu çalışmada sırasıyla 554 ila 1528 kg m⁻³, 1,1 ila 21 MPa ve %7,4 ila 28,3 arasında değişen yoğunluk, basınç dayanımı ve su emme özelliklerine sahip toplam kırk sekiz karışım yapılmıştır. Çalışmada köpük hacminin ağırlıklı olarak gözlenen çıktı özelliklerini etkileyen ana faktör olduğu gösterilmiştir. Bunu köpük hacim bileşenine kıyasla marjinal etki sağlayan kum / dolgu maddesi ve dolgu maddesi / çimentonun izlediği sonucuna varılmıştır (Youssef, vd., 2021).

Zhang ve Yang(2015) tarafından yapılan çalışmada, pisti aşan uçakları yavaşlatmak için ekonomik ve tahribatsız bir köpük beton ile uçak tutma sistemine odaklanılmıştır. 305,2 kg m⁻³ yoğunlukta bünyesinde portland çimentosu, perlit, köpürme ajanı, süper plastikleştirici ve su barındıran köpük beton üretilmiştir. Fiziksel boyutları 1,0 x 1,0 kare ve kalınlığı 0,32 m olacak şekilde numuneler üretilip tutucu sisteminin etkinliğini göstermek ve APM (analitik tahmin modeli)'yi doğrulamak için bir Boeing 737-300 uçağı kullanılarak tam ölçekli bir tutma testi yapılmıştır. Bu köpüklü beton durdurma sistemi test çalışmasının sonuçlarına ve gözlemlerine dayanarak, tutucu test yatağının, pistten aşan bir Boeing 737-300 uçağını, uçak iniş takımlarına önemli bir zarar vermeden güvenli bir duruşla etkili bir şekilde yavaşlatabileceği sonucuna varılmıştır. Köpüklü beton sistemi, taşan uçağı yavaşlatmak ve pist güvenliğini takdire şayan bir şekilde iyileştirmek için alternatif bir sivil uçak durdurma sistemi olarak kullanılabilir. APM'nin Boeing 737-300 uçak durma mesafesi, yavaşlama ve uçak hız düşüşünü tahmin etmedeki doğruluğu başarıyla doğrulanmıştır. Verilen uçak parametreleri ve tutucu yataktan uçak durma mesafesinin tutucu malzeme heterojenliğine duyarlılığı, iniş takımı sertliği araştırılmıştır. Ölçülen tüm değerlerin APM tarafından tahmin edilenlerin %10'u içinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, çift

iniş takımına sahip diğer uçaklar APM kullanılarak güvenilir bir şekilde nasıl durdurulacağı tahmin edilebilir olduğu görülmüştür (Zhang ve Yang, 2015).

Sanjayan vd.(2015) tarafından yapılan çalışmada, EMAS sistemine alternatif bir sistem tasarlamak amacıyla üretilen hafif betonlarda bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun üretimi esnasında fosil yakıtın kullanılması ve kireçtaşının kalsinasyonu sonucu atmosfere önemli ölçüde karbondioksit (CO_2) salınmaktadır. Karbondioksit atmosferde kızılötesi ışınları tutarak atmosferin ısınmasına neden olan sera gazı oluşmasına sebebiyet vermektedir. Küresel ısınmaya katkıda bulunması nedeniyle portland çimentosu içermeyen beton arayışı için araştırmalar sürmektedir. Bağlayıcı olarak portland çimentosu yerine silika ve alüminat içeren malzemenin alkali ile aktive edilerek elde edilen betonlara “Geopolimer Beton” adı verilmiştir(Posi ve diğerleri, 2015). Geopolimer beton 1980’lerde kireç taşı, kaolinit ve alkali dolomit karıştırılmasıyla Joseph Davidovits tarafından doğaya zararı olmayan beton üretilmeye başlanmıştır (Sanjayan, vd., 2015).

Literatür araştırmasında EMAS için uygun olduğu belirtilen betonların mukavemet değerlerinde geniş bir aralık olduğu tespit edildiğinden uçak lastik basınçları dikkate alınarak geniş aralığın daraltılması hedeflenmiştir.

Durlanık (2003) tarafından yapılan bir çalışmada uçak lastik basınçları için çift lastik 1,17 MPa (170 psi), çift tandem lastik 1,31 MPa (190 psi), çift tandem lastik 1,41 MPa (205 psi) olduğunu belirtilmiştir (Durlanık, 2003).

Uçak lastik basınçları uçağın ağırlığına ve teker düzenine göre değişiyor olsa da 0,52 MPa (75 psi) ve 1,38 MPa (200 psi) arasında değişmektedir (Kuloğlu, Özdemir ve Kök, 2007).

Bu nedenle çalışmada üretilen geopolimer hafif malzemelerin basınç mukavemetinin SGAS yatağına giren tüm uçakları güvenli bir şekilde durdurabilmesi için 1 MPa (146 psi)’nin altında, ARFF araç lastiklerinin platform üzerinde batmadan müdahalelerini sağlayabilmesi için 0,35 MPa (50 psi)’ an yüksek olması hedeflenmiştir.

2.2. Geopolimer Beton

Davidovits, Fransa'da 1970-1993 yılları arasında organik esaslı plastikten kaynaklanan yangın sonrasında yanmaz malzeme üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu

çalışmaları sırasında, çimentoya alternatif bir bağlayıcı olan geopolimerler üzerinde yoğunlaşmıştır. Geopolimerler, alümin ve silikat içeren malzemelerin alkalilerle reaksiyonu sonucu elde edilen inorganik polimer kompozisyonlarıdır. Uçucu kül termik santrallerde yüksek oranlarda bulunduğu ve düşük maliyetli olduğu için alüminosilikat kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer endüstri atıkları da kullanılarak, geopolimer bağlayıcılar geleneksel Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarını %80 azaltabildiği görülmüştür (Tokay, 2019).

Geopolimer ve Portland çimentolu betonların dayanıklılığı, Zeybek (2009) tarafından yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Çimentolu betona göre şimdilerde %10-15 daha maliyetli olmasına rağmen, geopolimerin rötre, yangın dayanımı ve basınç dayanımı özellikleri çok daha üstündür. Fiziksel dayanıklılık (durabilite) özellikleri zamanla gözlemlenebilir hale gelmektedir. Uçucu kül temelinde olan geopolimer çimento üretilmesinde, uçucu kül öğütülerek incelik modülünün artırılır ve hamurdaki mikro yapıyı iyileştirerek basınç dayanımını artırmaya yardımcı olur. Alkali sülfatlar (Na₂SO₄), geopolimer ve diğer çeşitli asit etkilerine karşı yüksek dayanıklılık sergileyebilir ve pH 12'den daha yüksek ortamlarda bile sentezlenebilir. Ayrıca, geopolimer betonda alkali silika reaksiyonları gibi tehlikeli ve mikroyapıyı bozan sorunlar oluşmaz. Geopolimer çimentolu prefabrik beton üretimi ile ilgili bir çalışmada, atık su büz borularının üretiminde gereken asit aşındırma deneyleri uygulanmıştır ve sonuçlar, Portland çimentolu betonun sülfirik asit etkisine 50 yıl dayanabildiği, geopolimer betonunun ise 900 yıl dayanabileceğini göstermiştir. Geopolimer betonunun yangın dayanıklılığı da Portland çimentolu betonun dayanıklılığı ile karşılaştırılmış ve 1000°C sıcaklıkta yanmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, prefabrik beton üretiminde buhar kürü uygulandığında, Portland çimentolu beton 20 MPa'lık bir dayanıma ulaşırken, 100 MPa dayanım gerektiren geopolimer çimentolu prekast beton 70°C'de 2 saat kür sonrasında 70 MPa erken dayanıma ulaşabilmektedir (Zeybek, 2009).

Binici ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, uçucu küller kullanılarak üretilen betonların geleneksel olarak üretilen betonlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Geopolimerlerin karışım aşamasında kullanılan su, işlenebilirliği artırmak için kullanılırken, geopolimerin kür ve kuruma sürecinde içinde süreksiz nano boşluklar bırakılarak terk edilir. Bu durum, geopolimerin hafifliği, ısı

yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özellikler kazanmasını sağlar. Alkali aktivasyon yöntemiyle elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşüktür ve donatıyla olan aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları oldukça yüksektir (Binici, vd., 2012).

Çelikten ve Atabey (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, "geopolimer" terimi, sodyum ve potasyum gibi alkalilerle aktive edilmiş alüminosilikatların tanımlanması için kullanılmaktadır. Alkali ile harç üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu atıkların aktivasyonu için sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, potasyum silikat gibi aktivatörler sıklıkla tercih edilmektedir (Çelikten ve Atabey, 2021).

Rangan (2014) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel betonlar ile geopolimer beton arasındaki agregasyon tartışılmıştır. Geleneksel olarak kullanılan betonlarda portland çimentosu kullanılmaktadır. Bu beton ile geopolimer beton arasındaki fark bağlayıcı malzemenin farklılığıdır. Termik santrallerin atık ürünü olan F sınıfı uçucu külde bulunan alüminyum oksit ve silisyum dioksitin bağlayıcı olarak aktifleştirilmesi sonucu ince ve kaba agregaları birbirine bağlayarak geopolimer beton üretilmektedir. Üretilen geopolimer betonun %75 ile %80'i agrega olup bu oran geleneksel betonla ortak yanı olduğu görülmüştür (Rangan, 2014).

Beton üretimi ilk yapımından günümüze kadar gelişmekte olan bir teknolojidir. Kullanılan beton insan yaşamının gereksinimlerini karşılayacak biçimde üretilerek yaşam standartlarının yükselmesini sağlamaktadır.

İnsan elinde ihtiyaca göre şekillenip kullanılan bu teknoloji ile üretilen;

Nükleer tesis gibi radyasyonun ve yıkıcı etkinin fazla olduğu alanlarda birim hacmi ağırlığı yüksek olan ağır beton,

İnşaatlarda ölü yükü azaltmak için fazla mukavemet gücüne sahip olması beklenmeyen duvar, dış cephe kaplaması gibi alanlarda hafif beton,

Sık donatılı dar veya derin olan kesitler gibi beton dökümünün mümkün olmadığı alanlarda kendi ağırlığı ile yerleşen beton,

Asfalt uygulamalarının tercih edilemeyeceği alanlarda silindirle sıkıştırılmış beton ve daha birçok beton türü kullanılmaktadır.

Tez çalışmamda EMAS üretimi için yoğunluğu düşük olan belirli yükler altında ezilen bir hafif beton türüne ihtiyaç vardır.

2.3. Hafif Beton

TS EN 206-1, 2000 standardına göre, birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında değişen beton türleri, etüv kurusu olarak adlandırılır.

Bu betonlar, temel bileşen malzemeleri açısından geleneksel betonlarla neredeyse aynı özellikleri gösterirler. Ancak, hafif betonlar, m^3 başına düşen ağırlığı azaltmak için farklı yöntemler kullanırlar.

Normal beton yüksek birim ağırlığına sahip olduğundan, hafif beton üretmek için öncelikle betonun birim ağırlığının azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla, sıklıkla üç yöntem kullanılmaktadır:

1. Birim ağırlığı düşük ve boşluklu yapıda olan doğal veya yapay hafif agregalar kullanmak,
2. Beton içerisinde büyük miktarda boşluk oluşturabilecek kimyasal ya da fiziksel katkıları kullanmak,
3. Beton içerisinde kullanılan ince agregayı çıkararak kumsuz betonlar üretmektir (Sayın, 2022).

Doğal veya yapay hafif agregalar kullanarak hafif beton üretme yöntemi, geleneksel betonda kullanılan agregadan farklı olarak ponza, diatomit, tüf, lav cürufu, genleşmiş şist ve kil, genleştirilmiş vermikülit, genleştirilmiş perlit gibi düşük yoğunluğa sahip agregaların kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Kimyasal veya fiziksel katkı kullanarak betonun köpürmesi ve hava boşluklarının oluşmasıyla hacimsel olarak artması ve yoğunluğunun azalması sağlanan ikinci yöntem ise beton üretimi sırasında çeşitli ajanların kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

Üçüncü yöntem, beton üretiminde kullanılan ince agrega bölümünden hiç malzeme alınmadan beton üretme tekniğidir. Bu yöntemde, kaba agregalar arasında geçiş sağlayacak ince agregalar kullanılmadığından, boşluklar oluşur ve bu sayede betonun yoğunluğu azaltılır.

ACI 213R-03 standardına göre, taşıyıcı hafif beton, 28. gündeki basınç dayanımı 17 MPa'dan fazla olan ve ayrıca birim hacim ağırlığı 1120 kg/m³ ile 1960 kg/m³ arasında olan betonlara verilen bir isimdir.

TS EN 206-1 standardına göre hafif beton, birim hacim ağırlığı 800 kg m⁻³ ile 2000 kg m⁻³ arasındaki betonları ifade etmektedir. Hafif beton üretiminde, bir kısmı veya tamamı hafif agrega olarak kullanılan hafif agregalar kullanılır.

TS 2511 standardına göre, taşıyıcı hafif betonlar 28. gündeki basınç dayanımı 16 MPa'dan büyük ve birim hacim ağırlığı 1900 kg m⁻³'ten az olan betonlardır. Bu tanımlama Antaki ve Wahhab tarafından yapılmıştır (Antaki ve Wahhab, 2020).

EMAS şartnamesinde belirtilen şartlar dahilinde literatür çalışmaları da göz önünde bulundurulduğunda, tez çalışmamızda geopolimer hafif malzeme üretimi yapılarak 600kg m⁻³ den daha az yoğunlukta ve 0,35 ile 1 MPa aralığında basınç mukavemetine sahip geopolimer köpük malzeme üretilenektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu tez çalışmasında, termik santral atığı olan uçucu külleri değerlendirerek geopolimer hafif malzeme üretilip SGAS olarak kullanılabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır.

Toz bağlayıcı malzeme olarak Uçucu Kül (UK), Silis Dumanı (SD), Kalsiyum Alüminat Çimentosu (KAÇ), Alkali Aktivatör olarak Sodyum Hidroksit (SH), Sodyum Silikat (SS), katkı olarak Köpük Ajanı (KÖA) ve Hidrojen Peroksit (HP) kullanılmıştır.

Geopolimer karışımların üretilmesinde kullanılan malzemelere ait detaylar aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Su

Katı halde bulunan sodyum hidroksitin 10 Molar çözelti haline çevrilmesi için Iğdır Üniversitesi Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı laboratuvarında Şekil 3.1’de gösterilen GFL isimli cihazdan saf su temin edilmiştir.



Şekil 3.1. GFL markalı cihazdan alınan saf su

3.1.2. Uçucu kül

Geopolimer üretiminde, F sınıfı uçucu kül, olumlu bir katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca, sodyum hidroksit, bu malzemenin aktive edilmesi için daha etkili bir aktifleştirici olarak kabul edilir (Shahmansouri, vd., 2021). Sodyum silikat bileşiği ile sodyum hidroksit bileşiğinin birlikte kullanımı, daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmayı sağlamıştır (Mohseni, 2018). Bu durum, sodyum silikatın geopolimerizasyon aşamasında silisyumlu tepkimelerin sayısındaki artışla beraber, tepkimenin ürünü olan Si içeren maddelerin miktarının artması sonucu basınç dayanımında daha fazla kazanım elde edilmesiyle açıklanabilir.

UK, küçük boyutta ve koyu gri renkte olabilir. Bu koyuluğunun veya açıklığının sebebi, yanan kömür tipine ve yanma şekline bağlıdır. Kömürdeki yanmayan karbon miktarı arttıkça, renk siyahlaşır. İyi yanma özellikleri olan kömürlerin yanması sonucu oluşan uçucu kül ise genellikle açık renkli olma eğilimindedir (Tokay, 2019).

Uçucu kül, termik santrallerde öğütülmüş kömürün yanması sonucu oluşan atık bir maddedir. Bu atık, elektrostatik çöktürücü filtreler veya filtre torbaları aracılığıyla tutulur ve daha sonra uçucu kül silolarında depolanır. Uçucu kül, öğütme, kütleme, kireç katma veya alkaliler kullanarak aktive edilerek beton endüstrisinde kullanılabilir. Ancak sınıfsız uçucu kül, çimento ve beton standartlarına uygun olmadığından çevre kirliliği riski taşır.

Geopolimer bağlayıcıların sentezinde, silika ve alümina açısından zengin malzemeler olan uçucu kül, cüruf, kaolin ve metakaolin gibi inorganik polimerler yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, yüksek mekanik performansı nedeniyle, geopolimerin esas malzemesi olarak öne çıkan en önemli malzemelerden biridir (Topçu ve Sofuoğlu, 2020).

UK, kömürün yanma sürecinde oluşan bir yan üründür ve özellikleri, yanma sıcaklığına, yanan kömürün tipine, öğütülmüş kömürün inceliğine, filtredeki ayırma sürecine ve homojenizasyona bağlı olarak değişir. UK'nın incelik derecesi öncelikle kömürün öğütülme derecesinden etkilenir. İkinci olarak, UK'nın inceliğini etkileyen faktör, mümkün olduğunca bacadan kaçmasının engellenerek tutulmasıdır. Kaçan miktarın azalması, UK'nın inceliğini artırır. UK, genellikle 0.5 mikron ile 200 mikron arasında değişen küresel şekilli malzemelerdir. Spesifik yüzeyleri 1.800 g cm⁻² ile 5.000

g cm⁻² arasında değişir ve ortalama olarak 2.800 g cm⁻² ile 3.800 g cm⁻² civarındadır (Altındal, 2020).

Düşük CaO içeriği ve yüksek alümina içeriği nedeniyle geopolimer sentezi için uygun olan Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu kül bu çalışmada tercih edilmiştir. İyi bir yanma sonucu elde edildiği açık renginden anlaşılan (Şekil 3.2) bu uçucu küle ait kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külü

Tablo 3.1. Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan uçucu külün özellikleri

Kimyasal İçerik (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOSS
	2,46	55,51	23,09	6,64	1,58	0,14	3,56	0,24	1,63
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Özgöl Ağırlık	Özgöl Yüzey Alanı (cm ² g ⁻¹)		Dayanım Aktivite İndeksi		Basınç Dayanımı (MPa)			
	2,13	3805		84,5		-			

3.1.3. Silis Dumanı

Silikon metalinin veya alaşımların saf ve ham haldeki kuvarsı yaklaşık 2000°C sıcaklıkta elektrik fırınlarında indirgenmesiyle elde edilir. Bu işlem sırasında yüksek miktarda SiO gazı açığa çıkar ve daha soğuk bir bölgede havayla temas ederek aniden yoğunlaşır. Bu yoğunlaştırılmış silis dumanı olarak da bilinen malzeme, amorf bir yapıya sahiptir ve içeriğinde yüksek oranda silika bulunur. Taneciklerinin aşırı inceliği nedeniyle, SD yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir ve betonda katkı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılır. Betonda kullanımı, çimento miktarını %10'a kadar azaltabilir ve yüksek dayanımlı betonlar elde edilmesine olanak tanır. Ayrıca puzolanik aktivitesinin yüksek olması neticesinde yüksek dayanımlı betonlar elde edilebilmektedir (Kalaycıklı, 2020). SD, basınç dayanımını, bağ dayanımını ve aşınma direncini artırırken, geçirgenliği azaltır ve C-S-H jeli oluşumunu destekler. Ayrıca, endüstriyel atıklarla birlikte kullanılarak, geopolimer üretiminde kullanılabilir ve dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırmak için nano parçacıklarla birlikte bağlayıcılara ilave edilebilir (Kaya, 2021).

Çalışmada kullanılan silis dumanı, Antalya'daki Eti Elektro Metalurji A.Ş.'nin ferrosilikon fabrikasından temin edilmiştir. SD, yüksek silika içeriğine (%95 SiO₂) ve yüksek inceliğe (20000 m² kg⁻¹ özgül yüzey alanı) sahip bir toz malzemedir (Şekil 3.3). Silis Dumanı' nın kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan silis dumanı

Tablo 3.2.Geopolimer harç üretiminde kullanılan Silis Dumanı' nın kimyasal içeriği

Kimyasal İçerik (%)	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	SO₃	SG (kgm⁻³)	SSA (m² kg⁻¹)
	1,4	94,6	0,5	1	0,21	2360	20000

3.1.4. Kalsiyum alüminat çimentosu

KAÇ, performansına ve kullanım amacına bağlı olarak Portland çimentosundan farklı saha uygulamalarında tercih edilebilmektedir. KAÇ ve Portland çimentosu arasındaki en önemli fark, hidrasyon sonucunda ortaya çıkan reaksiyon ürünlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu fark, çimentonun priz alma ve dayanım kazanma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. KAÇ, Portland çimentosuna göre daha hızlı priz alma ve dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Ancak, KAÇ'ın ileri yaşta dayanımı azalmaktadır. Bununla birlikte, KAÇ'ın sülfat direnci, yüksek sıcaklık direnci, aşınmaya karşı dayanıklılığı ve asitlere karşı dayanıklılığı, Portland çimentosuna göre daha üstündür (Tuyan, vd., 2020).

Portland çimentosuna kıyasla %40 ile %80 arasında daha fazla alümina içeren KAÇ hızlı mukavemet kazancı, yüksek aşınma direnci gibisi avantajlara sahiptir (Erkmen, 2018).

Hedeflenen mukavemet oranlarının sağlanması için yüksek alüminat içeriği, yüksek inceliği ve yüksek amorf yapısı nedeniyle çalışmada KAÇ kullanılmıştır (Şekil 3.4). Kullanılan alüminat çimentosu Çimsa tarafından üretilen torba halinde satılan Refro 50 olup kimyasal içeriği ve özellikleri Tablo 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan Kalsiyum alüminat çimentosu

Tablo 3.3. Kalsiyum Alüminat Çimentosunun özellikleri

Kimyasal İçerik (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOSS
	37,60	4,50	52,90	1,29	0,78	0,00	0,46	0,03	0,25
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey Alanı (cm ² g ⁻¹)		Dayanım Aktivite İndeksi		Basınç Dayanımı (MPa)			
	3,03	3600		-		24 saat ≥ 60			

Alkali aktivasyonunda en yaygın kullanılan alkali hidroksitler sodyum ve potasyumdur. Hidroksit ile aktive edilen UK içeren bağlayıcıların geçirgenliği ve çiçeklenmesi silikat ile aktive edilenlere göre genellikle daha fazla olmaktadır (Çelikten ve Canbaz, 2020). Yapılan bu çalışmada belirlenen oranlarda karıştırılan toz malzemelerin aktive edilmesi için sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır.

3.1.5. Sodyum Silikat (SS) Na₂O₃SiO₂

Sodyum silikat (Na₂SiO₃), en geniş silikat mineral grubu olan mineraller arasında yer alır. Silikat mineraller, var olan minerallerin yaklaşık %30'unu oluşturur ve toplam mineral hacminin %90'ını oluşturur. Yeryüzündeki en bol bulunan iki element "Si" ve "O" olduğu için, silisyum-oksijen bileşikleri yeryüzünün yaklaşık %95'ini oluşturur. Doğada yaklaşık 600 silikat minerali vardır, ancak sadece amfiboller, feldispatlar, mikalar, piroksenler, fedispatoitler, olivinler ve zeolitler kayaç oluşumunda

önemli bir rol oynar. Silikat minerallerinin temel yapısı, bir silisyum (Si) atomu merkezde ve dört oksijen atomu da köşelerde olmak üzere, silisyum atomuna bağlıdır (Altındal, 2020).

Çalışmada, görünümü berrak, kaynama noktası 120 °C, kokusuz, suda tamamen çözünen, normal depolama şartlarında kararlı olan SS kullanılmıştır. Kullanılan SS' in fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4.Sodyum Silikat'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	SS (sıvı)
Moleküler formül	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
Moleküler ağırlık (g/mol)	182,15
Renk	Jel (Renksiz)
Yoğunluk (g/cm^3)	1,39
Na_2O içeriği (%)	12,00
SiO_2 içeriği (%)	24,50
H_2O içeriği (%)	63,50

3.1.6.Sodyum Hidroksit (SH) NaOH

Sodyum hidroksit, Kostik olarak da bilinir. Bu kimyasal, ucuz olması, kolay ulaşılabilirliği ve arzu edilen miktarlarda kolayca bulunabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Beyaz renkli ve katı bir formdadır, yüksek sıcaklıklarda uçucu özellik gösterir ve su içinde ısı yayarak çözünür. Nem alırsa hidroksit bozulabilir. Potasyum hidroksite benzer özelliklere sahip olsa da, daha az yakıcı bir bazdır (Altındal, 2020).

Kostik Soda ya da SH olarak da bilinir. Su, etanol ve metanolda çözülme özelliği olan, kaynama noktası 1388 °C, fiziksel yapısı sıvı olan SH kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SH Şekil 3.5'te gösterilmiş olup, fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5.Sodyum Hidroksit’in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	SH (katı)
Moleküler formül	NaOH
Moleküler ağırlık (g mol^{-1})	40,01
Renk	Beyaz
Yoğunluk (g cm^{-3})	2,13
Na ₂ O içeriği (%)	-
SiO ₂ içeriği (%)	-
H ₂ O içeriği (%)	-



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan katı SH

Katı SH kütlesi 10 Molar konsantrasyonuna getirilmek için saf su içinde litre başına 313 gr eklenerek çözelti haline getirilmiştir (Pirazhn, 2016). Bu işlem esnasında saf suda sıcaklık artışı fazla olduğundan katı SH saf su içerisine bir defada dökülmek yerine kademeler halinde dökülerek çözündürülmüştür.

3.1.7. Köpük Ajanı

Sentetik esaslı KÖA hücresel beton yapımında kullanılması genleşme özelliğinin fazla olması nedeniyle yoğunluğu azaltma etkisi vardır (Özçelik ve Şimşek, 2022).

KÖA beton üretimi esnasında iki farklı şekilde kullanılmaktadır. İlk yöntemde beton hamuru üretimi esnasında harca ilave edilerek hamurun köpürmesi sağlanır. İkinci yöntemde ise KÖA ile elde edilen köpük beton hamuruna ilave edilerek üretim yapılmaktadır. Hücresel beton imalatında sentetik, reçine esaslı, bitkisel esaslı, organik, protein esaslı KÖA' ları kullanılmaktadır (Öztürk Yarar, 2021).

KÖA olarak geleneksel hücresel hafif malzeme üretiminde kullanılan sentetik esaslı Aydos Lightcon 28 ticari markalı hafif beton KÖA (Şekil 3.6) kullanılmış olup teknik bilgileri Tablo 3.6'da sunulmuştur.

Tablo 3.6. Çalışmada kullanılan KÖA teknik özellikleri

Kimyasal İçeriği	Sentetik sıvı hava sürükleyici
Görünüm-Renk	Şeffaf, soluk kahverengi sıvı
Yoğunluk	$1,03 \pm 0,02$ kg/l.
pH Değeri	5.0 ± 1
Klor İçeriği	<%0,1
Alkali İçeriği /	<%5
Donma Noktası	-5 °C



Şekil 3.6.Deneylerde kullanılan KÖA

3.1.8.Hidrojen Peroksit

HP (H_2O_2) mavi renkte olup su ile karıştırıldığında mavi rengini kaybedip renksiz bir hale dönüşen bir bileşiktir. HP, ayrışması esnasında oksijen gazı üreten bir gaz salma maddesidir (Kurtuluş, 2018).

HP geopolimer beton içerisinde köpürerek hava boşluklarının oluşmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Su ve oksijenden oluşan HP nin kimyasal denklemi (3.1) de verilmiştir. Karışım içerisinde hücrel boşluklar oluşturmak için %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada ticari bir firmadan temin edilen %50 konsantrasyonlu H_2O_2 kullanılmış olup Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan HP

3.2. Yöntem

Çalışmada kullanılan toz malzemeler ve alkali sıvı oranları sabit tutulmuş olup, karışımların katkısız ağırlığı (HP ve KÖA olmadan) 2000 gram olacak şekilde sabit olarak ayarlanmıştır. 2000 gr karışım içerisinde bulunan UK, SD, KAÇ, SH, SS miktarları için bazı oranlar kullanılmıştır.

KAÇ’ nun toz malzemelere oranı %5, SD’ nin toz malzemelere oranı %5, alkali sıvıların toz malzemelere oranı %60 olarak belirlenmiş olup Tablo 3.7’de gösterilmiştir.

Tablo 3.8’de ise 2000 gr lık her bir karışım kümesi için ihtiyaç duyulan malzeme ağırlıkları belirtilmektedir.

Tablo 3.7. Deneylerde kullanılan malzemelerin oranları

KAÇ / Toz Malz.	SD / Toz Malz.	Alkali Sıvılar / Toz Malz.
0,05	0,05	0,6

Her bir karışım için belirlenen 2000 g ağılığındaki geopolimer hamurun hazırlanmasında ilk olarak 10 molar 250 gr SH ve 500 gr SS karıştırılarak oluşturulan sıvı alkali 30 dk beklemeye alınmıştır. Alkali sıvılardan SS/SH oranı 2 olarak belirlenmiştir.

Toz malzemelerden olan 1125 gr UK, 62,5 gr SD ve 62,5 gr KAÇ mikser yardımı ile homojen bir dağılım elde edilinceye 10 dk kadar karıştırılmış ve sonrasında 30 dk boyunca bekletilen alkali sıvı, toz malzemenin üzerine dökülerek mikser yardımı ile 10 dk karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra geopolimer hamur üzerinde değişen kombinasyonlarda %0, %1, %2 oranlarında KÖA ve %0, %0,5, %1, %1,5 oranlarında HP aynı anda dökülerek 10 dk karıştırılmıştır. Üretilen taze geopolimer hamur karışımı prizmatik kalıplara dökülerek bekletilmeden 60 °C de ısıtılmış olan etüve kür için koyulmuştur. 24 saat boyunca etüvde bekletilerek prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 24 saat daha etüvde bekletilmiştir.

Daha sonra hafif malzeme numuneleri 28 gün boyunca oda sıcaklığında laboratuarda bekletilmiş ve ardından FAA pistten aşan uçaklar için geliştirdiği EMAS’ ın planlanması, tasarımı, kurulumu ve bakımı için 2012 yılında çıkardığı 150/5220-22B nolu standartları sağlayıp sağlamadığının tespiti için üretilen numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda basınç mukavemeti, yoğunluk, su emme oranı ve boşluk oranı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.8.Deneylerde kullanılan terazi.

Belirtilen oranlara denk gelen ağırlıkların ölçümleri için kullanılan terazi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Her bir karışım hazırlanırken Tablo 3.9’da belirtilen oranlardaki KÖA ve HP geopolimer hamurun üzerine ilave dılmıştır.

Tablo 3.8. Toz malzemeler ve alkali sıvılarının belirlenen oranlara göre ağırlıkları

TOZ MALZEMELER (gr)			ALAKALİ SIVI (gr)		TOPLAM (gr)
UK	SD	KAÇ	SH	SS	
1.125	62,5	62,5	250	500	2.000

2.000 Gramı oluşturan Tablo 3.8’deki miktarlar her 12 karışımında da sabit tutulmuştur. Malzemelerin üretimi sırasında fazla kabarma olup kalıplardan taşma ihtimali bulunduğuundan geopolimer hamurun rahat bir şekilde kabaracağı İğdır Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan yanlardan açılabilen prizmatik kalıp kullanılmıştır.

Sabit olarak seçilen 2.000 gramlık malzemeye %1 KÖA %2 HP seçilerek ilk deneme dökümü yapılmış ve bu şekilde üretilen geopolimer hamurun etüvde kür halindeyken kalıptan fazlasıyla taşıdığı gözlemlenmiştir. 24 saat sonra etüvden çıkarılan karışımın özellikleri incelendiğinde hedeflenen geopolimer malzeme özelliklerinin çoğunu taşıdığı ancak HP oranının %2’nin altında tutulması gerektiği kanaatine varılmıştır. Değişken oranların belirlendiği KÖA %0, %1, %2 oranları, HP için %0,

%0,5, %1 ve %1,5 oranları seçilmiş olup toplam 12 adet karışım üretilmiştir. Üretilcek geopolimer hafif malzemelerde kullanılan katkı oranları Tablo 3.9’da verilmiştir.

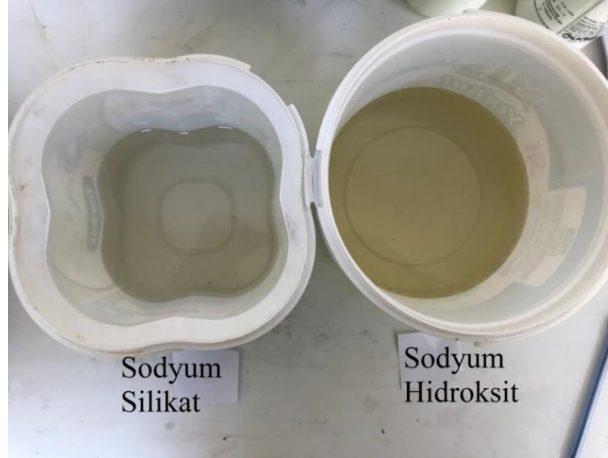
Tablo 3.9.12 adet karışımın KÖA ve HP ağırlıkça oranları

Karışımlar		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Oran (%)	KÖA	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
	HP	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1,5	1,5	1,5
Ağırlık (gr)*	KÖA	0	20	40	0	20	40	0	20	40	0	20	40
	HP	0	0	0	10	10	10	20	20	20	30	30	30

*2000gr karışım için gereken katkı malzeme ağırlıkları

Deneyssel çalışmada birinci aşama olarak 10M NaOH çözeltisi elde edebilmek için katı halde bulunan sodyum hidroksit saf su içerisine yavaş yavaş eklenerek çözünmesi sağlanmıştır. NaOH çözeltisi deneylerin gerçekleştirilmesinden en az 24 saat önce hazır hale getirilmiştir.

Çalışmada kullanılan alkali sıvıların metaller veya cam kaplar ile kimyasal tepkime yaşayabilme ihtimali göz önüne alınarak ilk aşamada Şekil 3.9’da gösterilen plastik deney kapları ve karıştırıcılar kullanılmıştır



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan sıvı SS ve 10 M SH çözeltisi

Deneye başlamadan en az 30 dk önce SS ve SH birbirine iyice karıştırılmıştır. Deney için Şekil 3.10’da gösterilen 40*10*10 cm³ ebatlarında birbirine menteşe ile bağlı 3 parçadan oluşan ve 2 adet saplama vida yardımı ile sıkıştırılan demir kalıp kullanılmıştır. Bu kalıp içine dökülen geopolimer karışım rahat bir şekilde köpürmüş ve priz sonrasında menteşeler açılarak kalıptan kolayca çıkarılmıştır.



Şekil 3.10. Deneysel çalışmada kullanılan 40*10*10 cm³ kalıp

Deneme dökümünde taşan geopolimer hamur demir kalıba yapıştığı için sonraki deneylerde kalıp LubricoHydrolubeHlp markalı endüstriyel hidrolik yağ ile iyice yağlanmış ve hamur ile temas edecek alanlar ince streç film ile sarıldıktan sonra tekrar yağlanmıştır.



Şekil 3.11. Geopolimer hamur yapımında kullanılan mikser

Deney reçetesinde belirlenen ağırlıklardaki UK, SD ve KAÇ birleştirilip 15 dk boyunca mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra alkali sıvı bu toz malzemenin üzerine dökülüp 10 dk daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Sonrasında HP ve KÖA aynı anda hamur üzerine dökülerek 10 dk daha karıştırılmıştır. Karıştırma işlemlerinde Şekil 3.11’de verilen laboratuvar mikseri kullanılmıştır.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra taze geopolimer hamur önceden hazırlanan kalıba kabarma payı da dikkate alınarak dökülmüştür (Şekil 3.12). Hazırlanan karışım priz alması için Şekil 3.13'te görüldüğü gibi 60 °C sıcaklıktaki etüve konuldu. Fazlaca kabaran karışımların kalıptan taşan kısımları sıyırılarak alındı.



Şekil 3.12. Kalıba dökülmüş taze geopolimer hamur

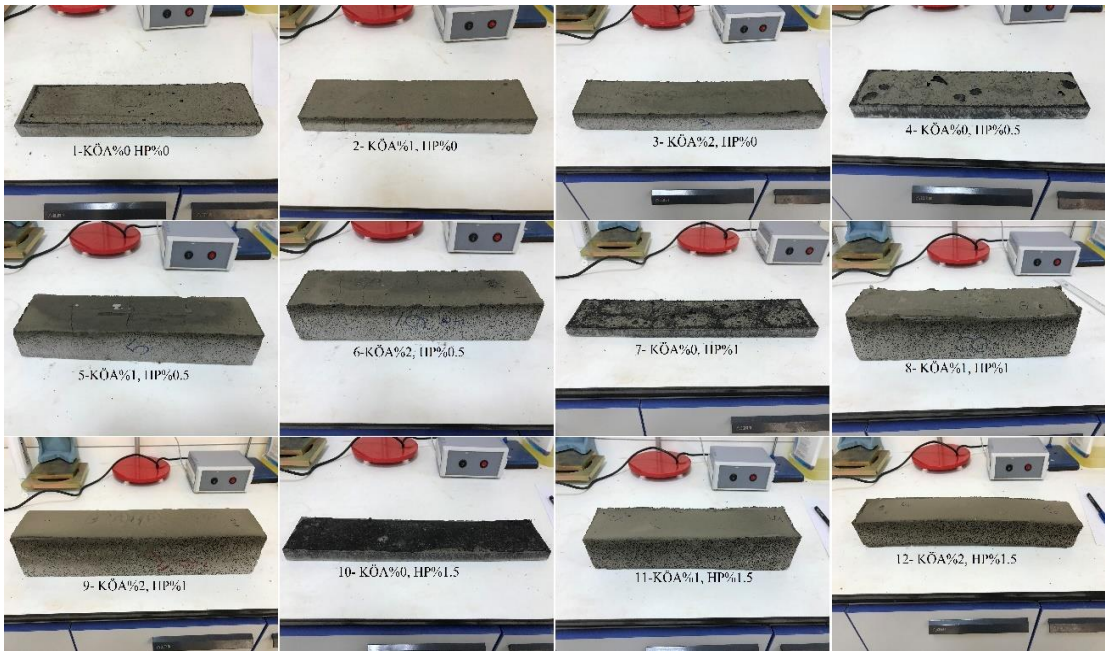


Şekil 3.13. Etüv içerisine konulan geopolimer malzeme



Şekil 3.14. Kalıptan çıkarma işlemi

Etüvde 24 saat boyunca bekletilen geopolimer malzeme numuneleri Şekil 3.14'te görüldüğü gibi kalıptan çıkarılmıştır. Priz aldıktan sonra kalıplardan çıkarılan numuneler tekrar etüve bırakılarak 24 saat daha 60 C sıcak küre devam edilmiştir. Böylece 36 saatlik sıcak kürü tamamlanan numuneler laboratuvar ortamında ilave 28 gün küre bırakılmıştır. Laboratuvarda küre bırakılan numuneler Şekil 3.15'te görülmektedir. Karışım kombinasyonuna göre bazı numuneler kabarmamış, bazıları ise hacim artışı sonrasında geri çökmüştür. Bu nedenle numunelerin yüksekliklerinde farklılıklar oluşmuştur.



Şekil 3.15. Etüvden çıkarılan geopolimer malzemelere ait görseller

28 gün sonra numuneler üzerinde yeteri kadar deney yapılabilmesi için 12 adet ana numune elektrikli daire testere ile kesilerek her birinden 10-12 adet küp numune üretilmiştir. Şekil 3.16’da küp halinde kesilen geopolimer malzeme gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Ana malzemeden kesilerek oluşturulan küp numune

3.2.1.Basınç Dayanımı Deneyi ile Mukavemet Ölçümü

Reçeteye (Tablo 3.9) uygun olarak üretilen numunelere 28 günlük laboratuvar kürü sonrasında (30. günde) basma ve eğilme testi presinde 2400 N/sn yükleme hızı ile mukavemet ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm yapılmadan önce presin yükleme başlıklarında kalan numunelere ait parçalardan arındırılmıştır. Her numune grubundan en az 3 adet numune üzerine basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sayesinde numunelerin mukavemetleri belirlenmiştir. Basınç mukavemeti ölçümlerinde kullanılan test presine ait görsel Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17.Basma ve eğilme testi presi

3.2.2. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Geopolimer numunelerin suda bekletilip sonrasında emmiş oldukları su miktarının ağırlıklarına oranı ile su emme özelliği tayin edilmiştir. Karışımlar 28 günün ardından etüvde 110 °C’de 4 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığında yarım saat bekletilerek fırın kurusu olarak ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümler her seriden 4 numune üzerinden yapılmış olup, ortalama değerleri belirlenmiştir. Daha sonra tüm seriler üzerinde Arşimet prensibi ile çalışan terazi yardımıyla porozite ve su emme özellikleri TS EN 1170-6 (1999) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Karışımlar Şekil 3.18’de gösterildiği gibi 12 saat boyunca su dolu bir kapta bekletilmiş, daha sonra çıkartılıp tartının su içerisindeki sepete konularak Arşimet Terazisi yardımıyla ağırlıkları not edilmiştir. Daha sonra sepetten çıkarılan numunelerin yüzeyleri bir bez yardımı ile kurularak havadaki ağırlıkları ölçülmüştür (Dündar, vd., 2020).



Şekil 3.18. Kovada su içinde bekletilen numuneler

Deneyler kapsamında yer alan numunelere ait su emme ve boşluk oranları tayini için, geopolimer numuneler 4 saat etüvde 110°C’de sıcaklık kürü sonrasında 30 dk oda sıcaklığında bekletilerek her bir numunenin ağırlığı (∂EK) ölçülmüştür. Numuneler temiz su doldurulan kovada 12 saat bekletilmiştir. Kovadan çıkarılan numunelerin Şekil 3.19’da gösterilen Arşimet terazisi ile sudaki ağırlığı (∂SU) ölçülmüştür. Daha sonra numuneler doygun kuru yüzey haliyle terazide ölçümü yapılmıştır (∂DKY). Bu üç değerin yardımıyla formül 3.2 ve formül 3.3 kullanılarak su emme ve boşluk oranları hesaplanmıştır. Sertleşmiş numunede su emme oranı, etüv kurusu numunelerin suya doygun kuru yüzeyli duruma getirilmesi ile ortaya çıkan ağırlık artışının, etüv kurusu numune ağırlığına oranıdır.

Boşluk oranları ve su emme oranları için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial DKY - \partial EK}{\partial DKY - \partial SU} \times 100 = \text{Boşluk Oranı}(\%) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial DKY - \partial EK}{\partial EK} \times 100 = \text{Su Emme Oranı}(\%) \quad (3.3)$$

Burada;

∂DKY = Doygun Kuru Yüzey ağırlık (g)

∂EK = Etüv Kuru ağırlık (g)

∂SU = Su içindeki ağırlık (g) olarak değerlendirilmiştir.

3.2.3. Yoğunluk Tayini

Kuru birim hacim kütlelerin yoğunluğunun hesaplamasında TS EN 772-13' de belirtilen formülüne göre hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V} \times 10^6 \text{ (kg/m}^3 \text{)} \quad (3.4)$$

ρ = Yoğunluk

m = Kütle

V = Hacim



Şekil 3.19. Arşimet deney düzeneği

3.2.4. Durabilite Tayini

Yapılan basınç mukavemeti, su emme ve boşluk oranı tayini, yoğunluk deneyleri sonucunda hedeflenen özellikleri sağlayan karışımlara TS 3449 nolu standarda göre su içerisinde donma çözünme deneyi yapılarak durabilite özellikleri araştırılmıştır. Karışımlar Şekil 3.20’de gösterilen şekilde bir kaba koyularak numune boylarını 3-5 mm aşacak kadar musluk suyu ile doldurulmuştur. Daha sonra Şekil 3.21’de gösterilen UTEST METARIAL TESTING EQUIPMENT marka donma çözünme kabinine koyulmuştur. Kabin -18°C ile $+4^{\circ}\text{C}$ arasında 25 döngü yapılmak üzere ayarlanmıştır. 1 Döngü 300 dakika yani 5 saatte tamamlanmıştır. Deney sonrasında numuneler laboratuvar ortamında 3 gün bekletildikten sonra basınç mukavemeti deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 3.20. Numune boylarını 3-5 mm aşacak kadar musluk suyu ile doldurulan kap



Şekil 3.21. Utest Metarial Testing Equipment marka donma çözünme kabini

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması sonucunda üretilen geopolimer hafif malzemelere yapılan deneylerin sonuçları verilerek SGAS için uygunluğu tartışılmıştır.

4.1. Boşluk ve Su Emilimi Oranlarının Belirlenmesi

Etüvden çıkarılıp oda sıcaklığında 30 dk bekletildikten sonra ölçülen küp numunelere ait hassas ağırlık ölçümleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Etüvden çıkarılan küp numunelerin hassas ağırlık ölçümleri

ETÜV KURUSU							
Karışım No	Karışımındaki Katkı Oranları	Numune No				Standart Sapma	Ortalama (gr)
		1 (gr)	2(gr)	3(gr)	4(gr)		
K1	%0KÖA %0HP	22,40	23,56	23,25	24,06	0,60	23,32 gr
K2	%1KÖA %0HP	28,59	28,84	27,67	29,20	0,62	28,58 gr
K3	%2KÖA %0HP	43,76	45,96	44,37	44,67	1,14	44,69 gr
K4	%0KÖA %0,5HP	19,90	20,09	19,72	18,49	0,19	19,55 gr
K5	%1KÖA %0,5HP	43,88	42,52	43,63	43,42	0,72	43,36 gr
K6	%2KÖA %0,5HP	32,49	32,97	33,61	32,79	0,56	32,97 gr
K7	%0KÖA %1HP	14,40	11,26	14,85	15,09	1,96	13,90 gr
K8	%1KÖA %1HP	18,60	17,64	18,05	18,31	0,48	18,15 gr
K9	%2KÖA %1HP	17,29	17,61	18,17	18,23	0,45	17,83 gr
K10	%0KÖA %1,5HP	17,96	17,05	17,94	17,49	0,52	17,61 gr
K11	%1KÖA %1,5HP	13,93	14,32	14,75	14,23	0,41	14,31 gr
K12	%2KÖA %1,5HP	14,50	14,72	14,28	14,20	0,22	14,43 gr

Doygun kuru yüzey ve Arşimet terazisi kullanılarak yapılan ağırlık ölçüm sonuçları Tablo 4.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2. Arşimet terazisi ile belirlenen sudaki ağırlık ve DKY ağırlık ölçüm sonuçları

AĞIRLIK *			
Karışım No	Karışımındaki Katkı Oranları	Suda (gr)	DKY (gr)
K1	%0KÖA %0HP	12,53	28,40
K2	%1KÖA %0HP	13,31	36,20
K3	%2KÖA %0HP	9,76	73,68
K4	%0KÖA %0,5HP	10,20	23,58
K5	%1KÖA %0,5HP	9,12	72,24
K6	%2KÖA %0,5HP	4,91	67,93
K7	%0KÖA %1HP	6,44	17,16
K8	%1KÖA %1HP	-0,51	52,25
K9	%2KÖA %1HP	1,98	56,26
K10	%0KÖA %1,5HP	8,75	21,83
K11	%1KÖA %1,5HP	0,50	42,00
K12	%2KÖA %1,5HP	2,38	49,50

* Verilen değerler üç adet numunenin ortalama ağırlık değerleridir.

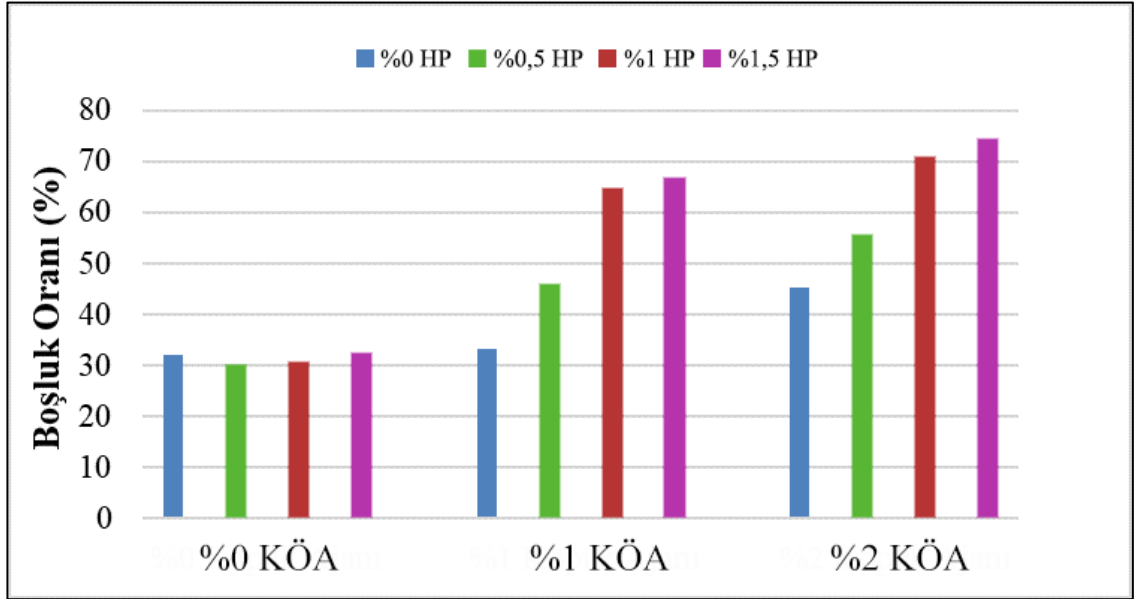
Tablo 4.1. ve Tablo 4.2. gösterilen etüv kuru su ağırlık, DKY ve karışımların sudaki ağırlıkları (3.2) ve (3.3) formüller ile hesaplanmış Tablo 4.3’de sunulmuştur.

Tablo 4.3. Boşluk oranı ve su emilimi oranı sonuçları

Karışım No	Karışımındaki Katkı Oranları	Boşluk Oranı (%)	Su Emilimi Oranı (%)
K1	%0KÖA %0HP	32,01	21,79
K2	%1KÖA %0HP	33,30	26,68
K3	%2KÖA %0HP	45,35	64,86
K4	%0KÖA %0,5HP	30,12	20,61
K5	%1KÖA %0,5HP	45,75	66,60
K6	%2KÖA %0,5HP	55,48	106,06
K7	%0KÖA %1HP	30,42	23,45
K8	%1KÖA %1HP	64,63	187,88
K9	%2KÖA %1HP	70,81	215,64
K10	%0KÖA %1,5HP	32,24	23,94
K11	%1KÖA %1,5HP	66,73	193,55
K12	%2KÖA %1,5HP	74,43	243,15

Tablo 4.3 incelendiğinde katkısız K1 karışımının %32,01 boşluk oranına sahip olduğu görülmektedir. En düşük boşluk oranlı (%30,12) karışım ise %0KÖA %0,5 HP içeren K4 nolu karışımıdır. En yüksek boşluk oranına sahip olan numunenin ise %74 boşluk oranıyla %2KÖA %1,5HP içeren K12 karışımıdır.

KÖA ve HP Oranının Boşluk Oranına Etkisi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. KÖA%0 olduğu durumda %0, %0,5, %1, %1,5 oranlarında HP kullanılmıştır. HP oranının %0 olduğu durumda boşluk oranı %32,01 olarak bulunmuştur. HP oranının tek başına katkı olarak yer aldığı durumlarda katkı oranı arttıkça boşluk oranında fazlaca bir değişiklik olmamıştır. HP nin yalnız başına katkı olarak kullanıldığı durumlarda karıştırma esnasında köpürme olsa da kabarcıklar kararlılığını koruyamamış, oluşan kabarcıklar parçalanarak sönme sonucunda içindeki gaz dışarıya çıkmış ve sonuç olarak hacimde azalma dolayısıyla da boşluk oranında düşüş meydana gelmiştir. Bu nedenle HP tek başına boşluklu bir yapı eldesinde etkin olmamıştır.

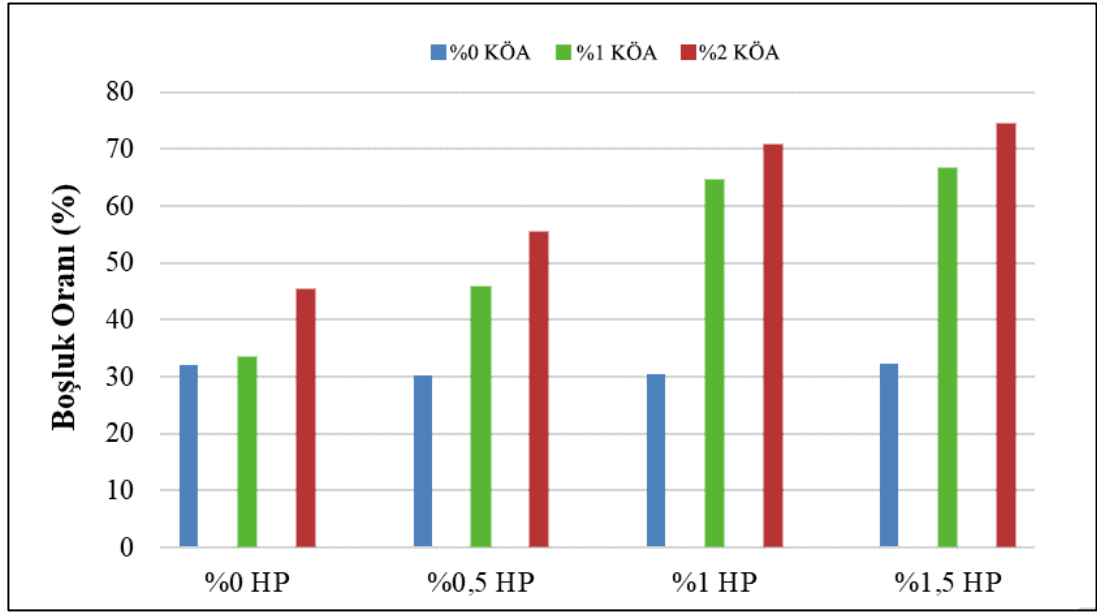


Şekil 4.1. KÖA Oranının boşluk oranına etkisi

KÖA%1’e çıkarıldığı durumlarda şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda boşluk oranı %33,30 olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda boşluk oranı %45,75 olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda boşluk oranı %64,63 olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise boşluk

oranının %66,73'e ulaştığı grafikten görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre KÖA%1 oranında sabit tutulmasıyla HP oranının 0,5 adımıyla %0'dan %1,5' e artırılması sonucunda boşluk oranının arttırdığı görülmüştür. KÖA%2'ye çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda boşluk oranı %45,35 olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda boşluk oranı %55,48 olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda boşluk oranı %70,81 olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise boşluk oranının %74,43'e ulaştığı grafikten görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre KÖA%2 oranında sabit tutulmasıyla HP oranının 0,5 adımıyla %0'dan %1,5' e artırılması sonucunda boşluk oranının arttığı görülmüştür. %1 ve %2 oranının KÖA ve HP' nin artırılmasıyla boşluk oranı yaklaşık %145 artmıştır. %1 ve %2 oranında KÖA katıldığında HP oranı artıkça boşluk oranında lineer bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi KÖA katkısı ile karışım içindeki kabarcıkların parçalanmadan karışım sertleşinceye kadar kararlı bir şekilde kalması sebebiyle yüksek boşluk oranı değerlerine ulaşılabilmiştir.

Sonuç olarak minimum boşluk oranı %30,12 olarak, %0 KÖA oranı ve %0,5 HP oranına sahip olan K4 nolu karışımda görülmüş olup, maksimum boşluk oranı ise %74,43 oranı ile %2 KÖA ve %1,5 HP oranına sahip olan K12. karışımında görülmüştür. Yapılan tüm karışımlar karşılaştırıldığında boşluk oranı KÖA ve HP' nin artırılmasıyla yaklaşık %145 artmıştır.

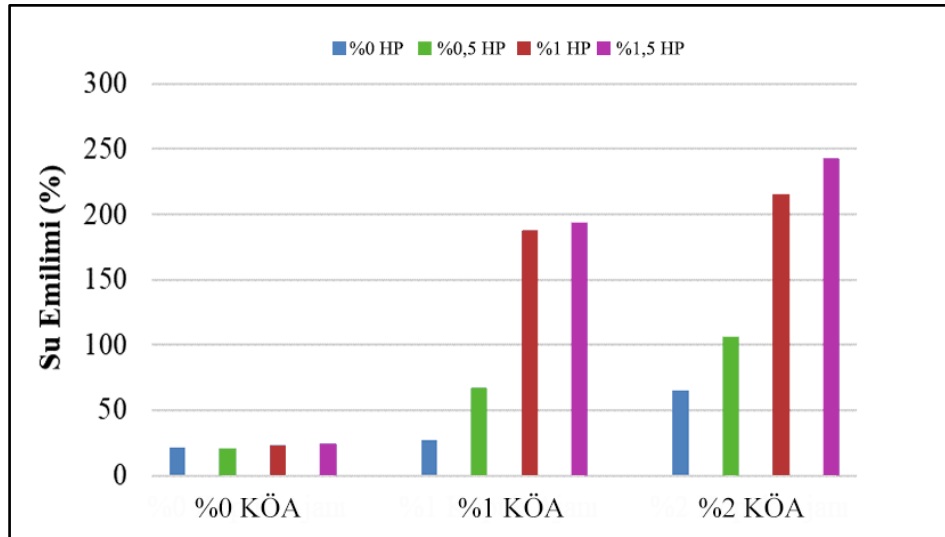


Şekil 4.2.HP'nin Boşluk Oranına Etkisi

Şekil 4.2 incelendiğinde ise HP oranları sabit tutulup, KÖA değişiklik yapılmıştır. Bu grafiğe göre %0 HP oranına sahip karışımlara sırasıyla %0, %1 ve %2 KÖA katılması sonucu boşluk oranındaki değişim gösterilmiştir. Bu değişime göre %0 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %32,01 boşluk oranı elde edilmiştir. %0 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise boşluk oranı %33,3 olarak hesaplanmıştır. %0 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda %45,35 boşluk oranı hesaplanmıştır. %0,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %30,12 boşluk oranı elde edilmiştir. %0,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda boşluk oranı %45,75 olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda ise %55,48 boşluk oranı hesaplanmıştır. %1 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %30,42 boşluk oranı elde edilmiştir. %1 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda boşluk oranı %64,63 olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda %70,81 boşluk oranı hesaplanmıştır. %1,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %32,24 boşluk oranı elde edilmiştir. %1,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise boşluk oranı %66,73 olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranına sahip

%2 KÖA eklenerek yapılan karışımda %74,43 boşluk oranı hesaplanmıştır. Dolayısıyla elde edilen bu değerlerle KÖA katkısının boşluk oranını artırdığı ispat edilmiştir.

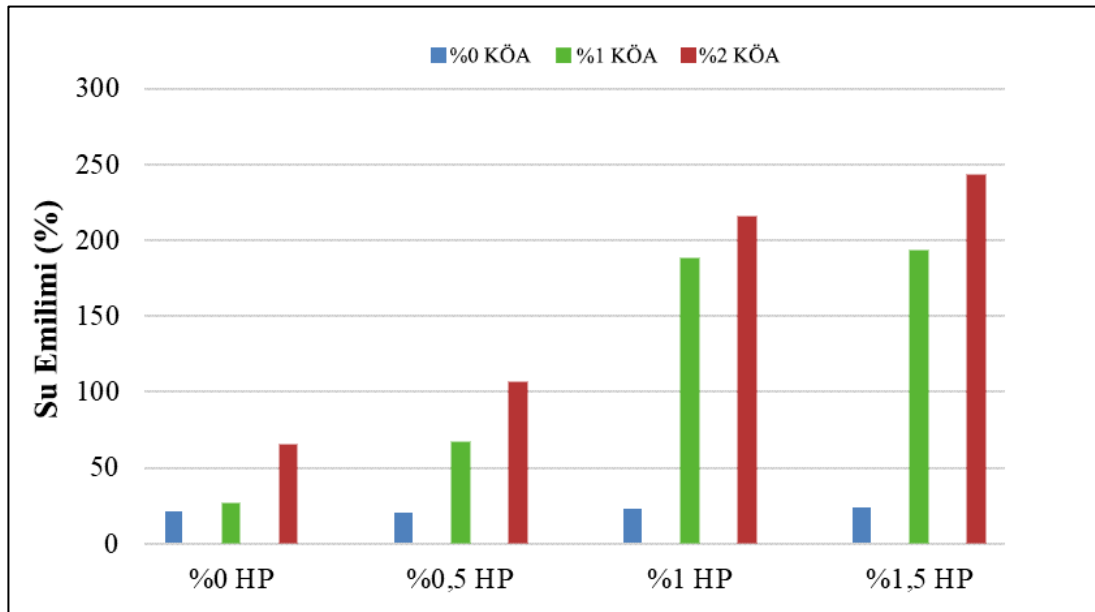
KÖA ve HP Oranının su emilimi oranına etkisi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. KÖA%0 olduğu durumda sadece HP kullanılmıştır. HP oranının %0 olduğu durumda su emilimi oranı %21,79 olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda su emilimi miktarı %20,61'e düşmüştür. HP oranının %1 olduğunda su emilimi oranı %23,45 olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise su emilim oranının %23,94'e ulaştığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre KÖA' nı %0 oranında sabit tutulmasıyla HP oranının 0,5 adımla %0'dan %1,5' e artırılması sonucunda su emilim oranını arttırdığı görülmüştür.



Şekil 4.3. KÖA oranının su emilimi oranına etkisi

Şekil 4.3 incelendiğinde KÖA%0 oranında sabit tutulmasıyla HP oranının 0,5 adımla %0'dan %1,5' e artırılması sonucunda su emilim oranının HP %0'da 21,79 olduğu izlenmiştir. HP oranının %0,5'e çıkarılmasıyla su emilim oranının %20,61'e düştüğü izlenmiştir. Bu bağlamda %2 düşüş yaşanmıştır, bu düşüşün sebebi geopolimer hafif hamur oluşturma esnasında oluşan kabarcıklar sertleşme sırasında açığa çıkan gazlar nedeniyle kararlılığını koruyamayarak sönmesi sonucunda geopolimer malzemenin hacimsel olarak küçülmesinden kaynaklanmaktadır. Çıkan gazların atmosfere salınımıyla birlikte hacim düşmüş dolayısıyla boşluk oranı da düşmüştür. Boşluk oranının düşmesiyle birlikte doğru orantılı olarak su emilim oranı da azalmıştır.

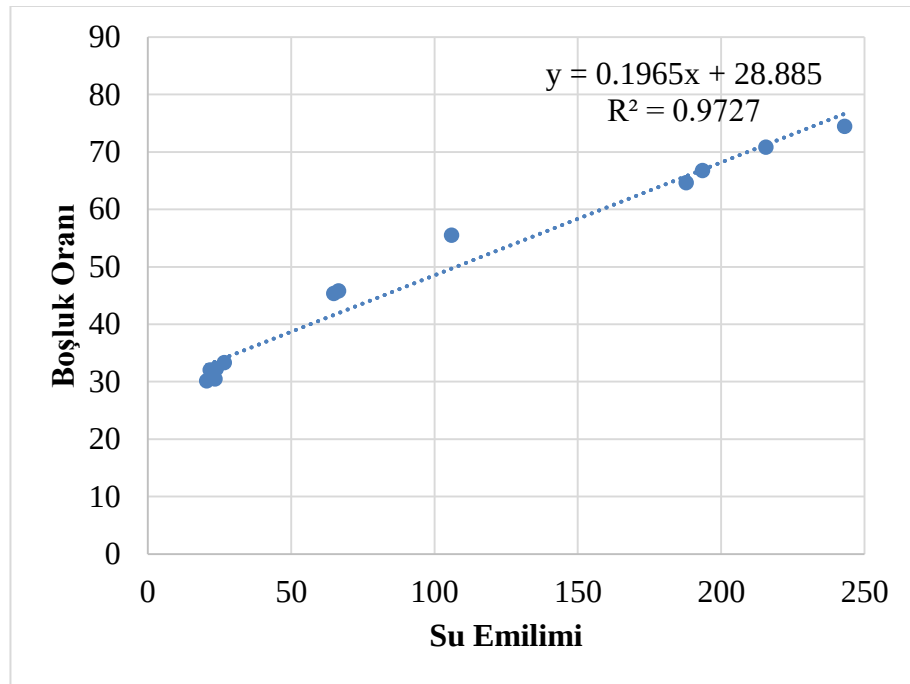
HP' nin %1 ve %1,5 olduğu durumlarda su emilim oranı sırasıyla %23,45 ve %23,94 olarak bulunmuştur. KÖA%1'e çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görölmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda su emilim oranı %26,68 olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda su emilim oranı %66,60 olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda su emilim oranı %187,88 olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise su emilim oranının %193,55'e ulaştığı grafikten görölmektedir. KÖA%2'ye çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görölmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda su emilim oranı %64,86 olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda su emilim oranı %106,06 olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda su emilim oranı %215,64 olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise su emilimi oranının %243,15'e ulaştığı grafikten görölmektedir. Grafikten de göröleceğı üzere en fazla su emilimi %1,5 HP ve %2 KÖA oranına sahip karışımında olduğı görölmektedir. Bu bağlamda su emilimi ile numune içerisindeki boşluk miktarının doğru orantılı olarak değıştiğı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. HP'in su emilim oranına etkisi

Şekil 4.4 incelendiğinde ise HP oranları sabit tutulup, KÖA oranında değışiklik yapılmıştır. Bu grafiğe göre %0 HP oranına sahip karışımına sırasıyla %0, %1 ve %2 KÖA katılması sonucu su emilimi oranındaki değışim gösterilmiştir. Bu değışime göre %0 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımında %21,79 su emilimi

oranı elde edilmiştir. %0 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise su Emilimi oranı %26,68 olarak hesaplanmıştır. %0 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda ise %64,86 su Emilimi oranı hesaplanmıştır. %0,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %20,61 su Emilimi oranı elde edilmiştir. %0,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise su Emilimi oranı %66,60 olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda ise %106,06 su Emilimi oranı hesaplanmıştır. %1 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %23,45 su Emilimi oranı elde edilmiştir. %1 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise su Emilimi oranı %187,88 olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda ise %215,64 su Emilimi oranı hesaplanmıştır. %1,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile elde edilen karışımda %23,94 su Emilimi oranı elde edilmiştir. %1,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak elde edilen karışımda ise su Emilimi oranı %193,55 olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek yapılan karışımda ise %243,15 su Emilimi oranı hesaplanmıştır. Dolayısıyla elde edilen bu değerlerle KÖA katkısının su Emilimi oranını artırdığı ispat edilmiştir.



Şekil 4.5. Boşluk oranı ve su Emilimi grafiği

Şekil 4.5'teki grafikte boşluk oranı ve su emilimi dağılımı gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde boşluk oranı arttıkça su emme oranında da artış olduğu yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Numunelerdeki boşluk oranları ve su emilimi incelendiğinde iki değer arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. Grafiğe bir eğilim çizgisi uygulandığında denklemi $y=0,1965x+28,885$ olduğu ve R^2 değerinin ise 0,9727 olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre %97'lik bir orantının olduğu açıkça görülmektedir. Bu bağlamda en fazla boşluk oranına sahip olan KÖA%2HP%1,5 oranlara sahip K12 numaralı karışımda en yüksek su emme oranı görülmektedir.

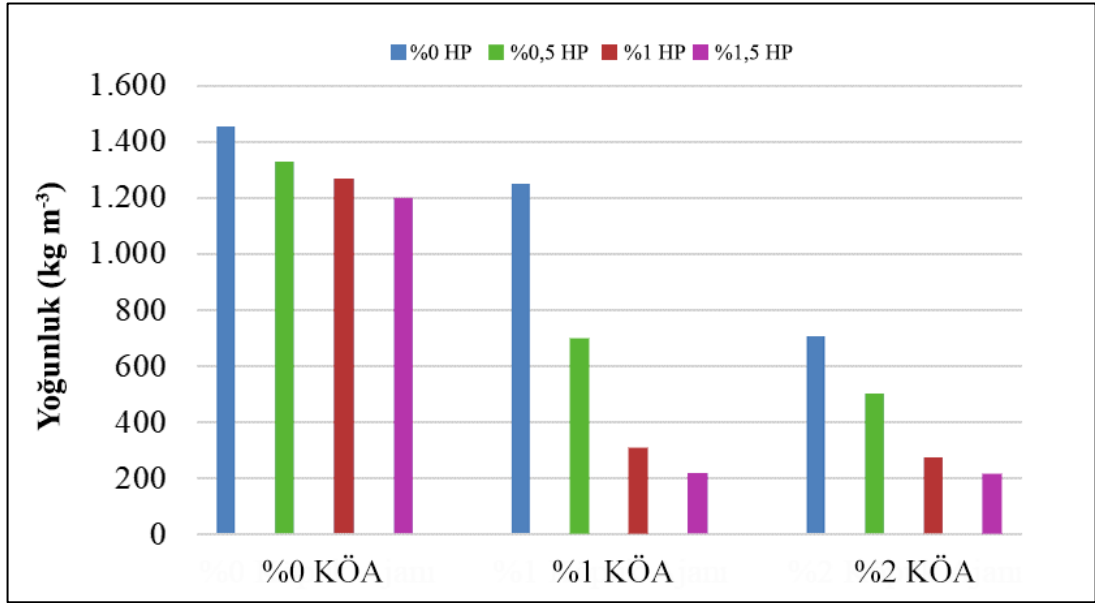
4.2. Karışım Yoğunluklarının Belirlenmesi

Hesaplama yapılırken her bir reçeteye ait üretilen 3 küpün ortalama ölçümleri üzerinden yapılmıştır. Tablo 4.4'te küplerden elde edilen X, Y ve Z kenarlarının ortalamaları alınarak alan hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplamalar daha sonra elde edilen ağırlık miktarlarına bölünerek formül (3.4) kullanılarak yoğunlukları belirlenmiştir.

Tablo 4.4. Küp karışımların yoğunluk hesabı

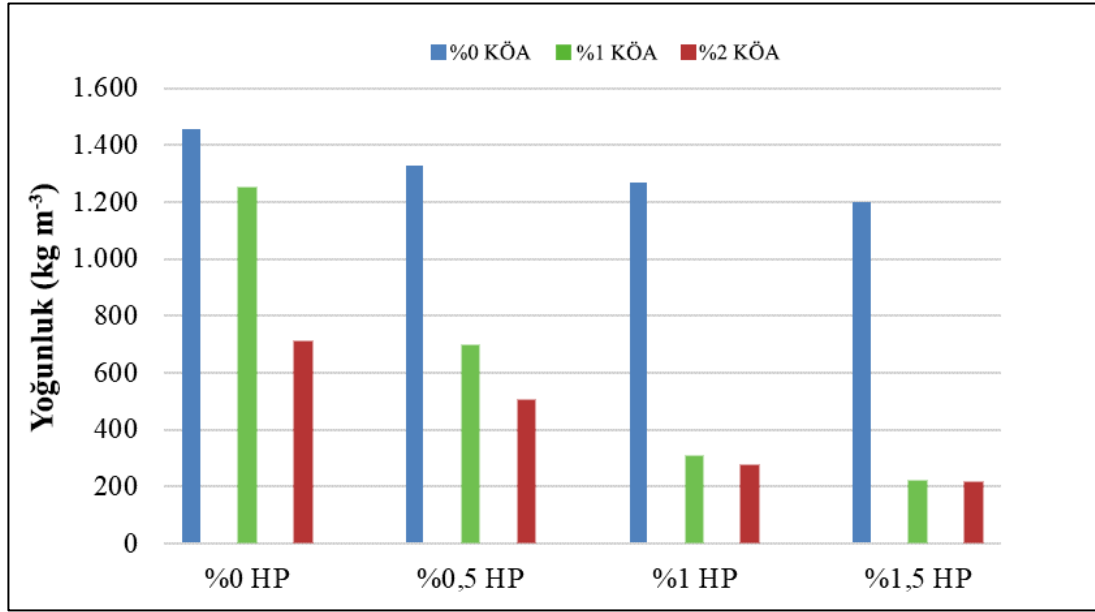
Karışım No	Karışımındaki Katkı Oranları	Hacim (cm ³)	Ortalama Ağırlık (gr)	Ağırlık Standart Sapma	Yoğunluk Kg m ⁻³
K1	%0KÖA %0HP	17,58	25,60	0,15	1456,53
K2	%1KÖA %0HP	22,74	28,39	0,58	1248,53
K3	%2KÖA %0HP	68,92	48,79	2,42	707,96
K4	%0KÖA %0,5HP	15,63	20,77	0,14	1329,28
K5	%1KÖA %0,5HP	68,92	48,08	0,31	697,61
K6	%2KÖA %0,5HP	68,92	34,72	0,54	503,81
K7	%0KÖA %1HP	9,26	11,77	0,25	1270,56
K8	%1KÖA %1HP	64,00	19,60	0,60	306,20
K9	%2KÖA %1HP	68,92	19,01	0,20	275,77
K10	%0KÖA %1,5HP	15,63	18,73	0,57	1198,93
K11	%1KÖA %1,5HP	64,00	13,98	0,70	218,44
K12	%2KÖA %1,5HP	68,92	14,94	0,04	216,72

KÖA ve HP Oranının yoğunluğa etkisi Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6. KÖA oranının yoğunluğa etkisi

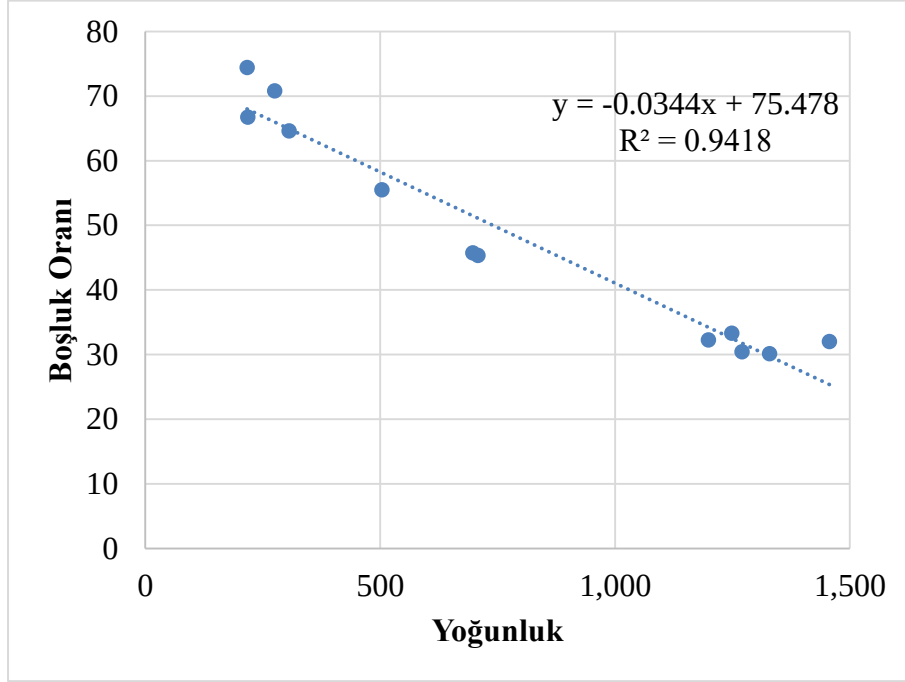
Şekil 4.6 incelendiğinde KÖA%0 oranında sabit tutulmasıyla HP oranının 0,5 adımla %0'dan %1,5' e artırılması sonucunda yoğunluğun HP %0'da $1.456,53 \text{ kg m}^{-3}$ olduğu izlenmiştir. HP oranının %0,5'e çıkarılmasıyla yoğunluğun $1.329,28 \text{ kg m}^{-3}$ 'e düştüğü izlenmiştir. HP' nin %1 ve %1,5 olduğu durumlarda ise yoğunluklar sırasıyla $1.270,56 \text{ kg m}^{-3}$ ve $1.198,93 \text{ kg m}^{-3}$ olarak bulunmuştur. KÖA%1'e çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda yoğunluk $1.248,53 \text{ kg m}^{-3}$ olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda yoğunluk $697,61 \text{ kg m}^{-3}$ olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda yoğunluk $306,20 \text{ kg m}^{-3}$ olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise yoğunluğun $218,44 \text{ kg m}^{-3}$ ulaştığı grafikten görülmektedir. KÖA%2'ye çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda yoğunluk $707,96 \text{ kg m}^{-3}$ olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda yoğunluk $503,81 \text{ kg m}^{-3}$ olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda yoğunluk $275,77 \text{ kg m}^{-3}$ olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise yoğunluğun $216,72 \text{ kg m}^{-3}$ ulaştığı grafikten görülmektedir.



Şekil 4.7. HP oranının yoğunluğa etkisi

Şekil 4.7’deki grafik incelendiğinde %0 HP oranına sahip karışımlara sırasıyla %0, %1 ve %2 KÖA katılması sonucu üretilen numunelerdeki yoğunluk değişimi gösterilmiştir. Bu değişime göre %0 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede yoğunluk $1456,53 \text{ kg m}^{-3}$ olarak elde edilmiştir. %0 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak üretilen numunede yoğunluk $1248,53 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %0 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede yoğunluk $707,96 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede yoğunluk $1329,28 \text{ kg m}^{-3}$ olarak elde edilmiştir. %0,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak üretilen numunede yoğunluk $697,61 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede yoğunluk $503,81 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede yoğunluk $1270,56 \text{ kg m}^{-3}$ olarak belirlenmiştir. %1 HP oranına sahip %1 KÖA üretilen numunede yoğunluk $306,20 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede yoğunluk $275,77 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranında sahip %0 KÖA eklenerek üretilen numunede $1198,93 \text{ kg m}^{-3}$ yoğunluk elde edilmiştir. %1,5 HP oranına sahip %1 KÖA eklenerek üretilen numunede ise yoğunluk $218,44 \text{ kg m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede ise $216,72 \text{ kg m}^{-3}$ yoğunluk hesaplanmıştır. Elde edilen bu verilere göre en

düşük yoğunluk KÖA%2, HP%1,5 oranında olan K12. No'lu karışımda 216,72 kg m⁻³ olarak, en yüksek yoğunluk KÖA%0, HP%0 oranında K1. No'lu karışımda 1456,53 kg m⁻³ olarak görülmekte olup TS EN 206-1' e göre tüm numuneler hafif beton için tanımlanan aralıkta kalmaktadır. Şekil 4.8'deki grafikte boşluk oranı ve yoğunluk dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.8.Boşluk oranı ve Yoğunluk dağılım grafiği

Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde boşluk oranı arttıkça yoğunlukta düşüş olduğu yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Numunelerdeki boşluk oranları ve yoğunluk incelendiğinde iki değer arasında ters orantı olduğu görülmüştür. Grafiğe bir eğilim çizgisi uygulandığında denklemi $y = -0,0344x + 75,478$ olduğu ve R^2 değerinin ise 0,9418 olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre %94'lük bir orantının olduğu açıkça görülmektedir. Bu bağlamda en fazla boşluk oranına sahip olan KÖA%2, HP%1,5 oranlara sahip K12 numaralı karışımda en düşük yoğunluk görülmektedir.

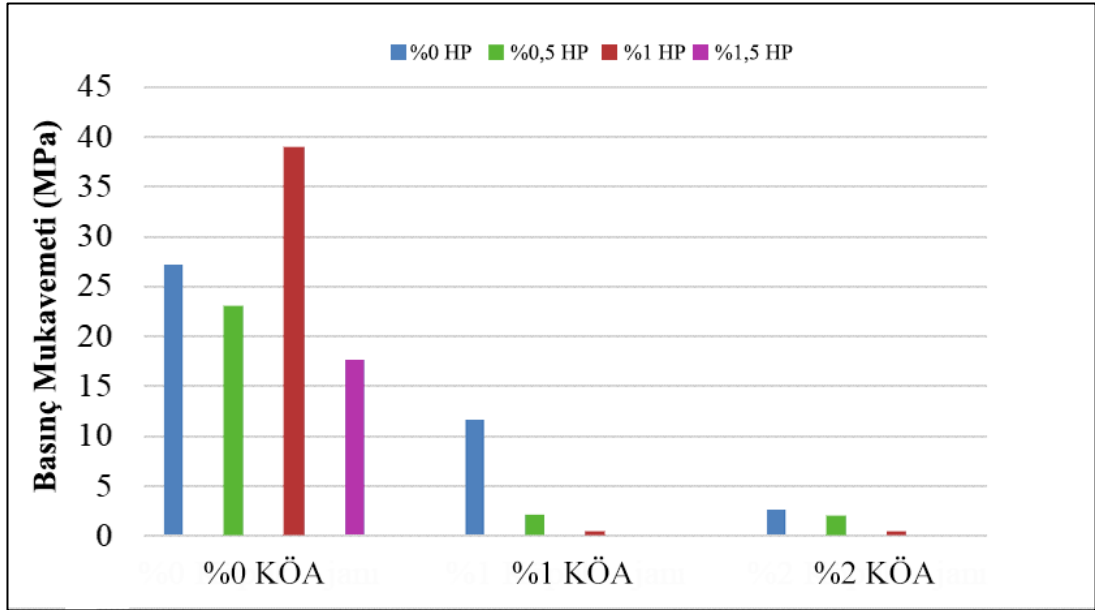
4.3. Basınç Mukavemeti

Üretilen hafif geopolimer numuneler üzerinde yapılan basınç mukavemeti deney sonuçları Tablo 4.5. de verilmiştir. Görüldüğü üzere en düşük ortalama mukavemet değeri 0,11 MPa ile %2KÖA %1,5HP katkılı K12 nolu karışım, en yüksek ortalama mukavemet değeri %0KÖA %1HP katkılı K7 nolu karışım olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. Hafif geopolimer karışımların basınç mukavemet değerleri

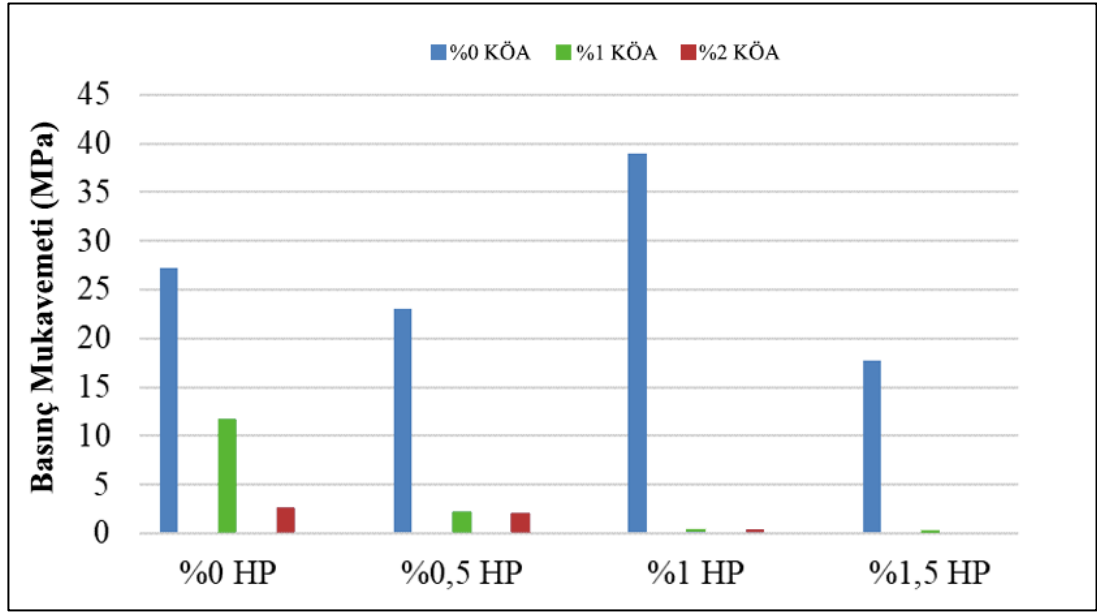
Karışım No	Karışımındaki Katkı Oranları	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Standart Sapma	Ortalama (MPa)
K1	%0KÖA %0HP	27.78	27.08	26.82	0,50	27.23
K2	%1KÖA %0HP	9.56	12.02	13.47	1,98	11.68
K3	%2KÖA %0HP	2.50	2.81	2.80	0,18	2.70
K4	%0KÖA %0,5HP	23.55	21.84	23.55	0,99	22.98
K5	%1KÖA %0,5HP	2.20	2.49	1.78	2,74	2.16
K6	%2KÖA %0,5HP	1.96	1.79	2.31	0,93	2.02
K7	%0KÖA %1HP	44.46	36.62	35.88	4,75	38.99
K8	%1KÖA %1HP	0.41	0.37	0.32	0,05	0.37
K9	%2KÖA %1HP	0.55	0.56	0.25	0,18	0.45
K10	%0KÖA %1,5HP	22.14	19.01	11.92	5,24	17.69
K11	%1KÖA %1,5HP	0.26	0.22	0.18	0,04	0.22
K12	%2KÖA %1,5HP	0.11	0.10	0.13	0,02	0.11

KÖA ve HP oranının basınç mukavemetine etkisi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9.KÖA oranının basınç mukavemetine etkisi

Şekil 4.9’da verilen grafik incelendiğinde KÖA oranı %0 olan karışımlarda HP oranı artışıyla basınç mukavemetinde bir azalış trendi olduğu görülmektedir. En düşük mukavemet değeri (17,69 MPa) HP oranının en yüksek olduğu (%1,5 HP) K10 karışımında gözlenmiştir. 0,5 adımla %0’dan %1,5’ e artırılması sonucunda basınç mukavemetinin HP %0’da 27,23 MPa olduğu gözlenmektedir. HP oranının %0,5’e çıkarılmasıyla basınç mukavemetinin 22,98 MPa’ya düştüğü görülmektedir. HP’nin %1 ve %1,5 olduğu durumlarda ise basınç mukavemeti sırasıyla 38,99 MPa ve 17,69 MPa olarak bulunmuştur. KÖA%1’e çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda basınç mukavemeti 11,68 MPa olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda basınç mukavemeti 2,16 MPa olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda basınç mukavemeti 0,37 MPa olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise basınç mukavemetinin 0,22 MPa’ya ulaştığı grafikten görülmektedir. KÖA%2’ye çıkarıldığı durumlarda ise şöyle bir dağılım görülmüştür; HP oranının %0 olduğu durumda basınç mukavemeti 2,70 MPa olarak bulunmuştur. HP oranı %0,5 olduğunda basınç mukavemeti 2,02 MPa olarak tespit edilmiştir. HP oranının 1% olduğunda basınç mukavemeti 0,45 MPa olarak ve son olarak HP oranının %1,5 olduğunda ise basınç mukavemeti 0,11 MPa ulaştığı grafikten görülmektedir.



Şekil 4.10. HP oranının basınç mukavemetine etkisi

Şekil 4.10'daki grafik incelendiğinde farklı HP oranına sahip karışımlara sırasıyla %0, %1 ve %2 KÖA katılması sonucu üretilen numunelerdeki basınç mukavemeti değişimi gösterilmiştir. Bu değişime göre %0 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede basınç mukavemeti 27,23 MPa olarak elde edilmiştir. %0 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak üretilen numunede basınç mukavemeti 11,68 MPa olarak hesaplanmıştır. %0 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede basınç mukavemeti 2,70 MPa olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranında sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede basınç mukavemeti 22,98 MPa olarak elde edilmiştir. %0,5 HP oranına sahip %1 KÖA katılarak üretilen numunede basınç mukavemeti 2,16 MPa olarak hesaplanmıştır. %0,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede basınç mukavemeti 2,02 MPa olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranına sahip %0 KÖA katkısı ile üretilen numunede basınç mukavemeti 38,99 MPa olarak belirlenmiştir. %1 HP oranına sahip %1 KÖA üretilen numunede basınç mukavemeti 0,37 MPa olarak hesaplanmıştır. %1 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen numunede basınç mukavemeti 0,45 MPa olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranında sahip %0 KÖA eklenerek üretilen numunede 17,69 MPa basınç mukavemeti elde edilmiştir. %1,5 HP oranına sahip %1 KÖA eklenerek üretilen numunede ise basınç mukavemeti 0,22 MPa olarak hesaplanmıştır. %1,5 HP oranına sahip %2 KÖA eklenerek üretilen

numunede ise 0,11 MPa basınç mukavemeti hesaplanmıştır. Elde edilen bu verilere göre en düşük basınç mukavemeti KÖA%2, HP%1,5 oranında olan K12. Numaralı karışımda 0,11 MPa olarak, en yüksek basınç mukavemeti KÖA%0, HP%1 oranında K7. Numaralı karışımda 38,99 MPa olarak görülmektedir.

%0KÖA %1 HP bulunan karışımda salınan oksijen gazlarının oluşan bağlara katkı sağladığından daha iyi bir geopolimerizasyon meydana geldiği için mukavemet değeri yüksektir. Ancak bu optimum değerden daha düşük ve yüksek oranlarda oksijen gazları geopolimer yapının düzensizliğine sebep olduğundan optimum şartlardaki mukavemet elde edilememiştir. Mikro yapı analizi, atomik kristal yapı analizleri ile doğrulanması, irdelenmesi gerekmektedir. XRD FDIR SEM analizleri ile desteklenmelidir.

4.4 Durabilite Özellikleri

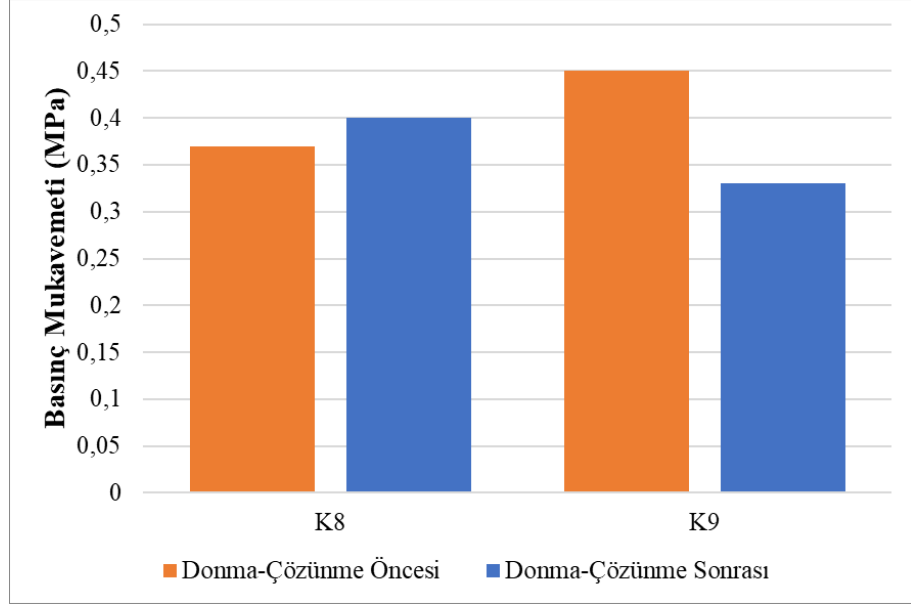
Suda donma çözünme deneyinden sonra karışımların bazıları dağılmış, bazılarında ise soyulmalar olduğu gözlenmiştir. Sağlam kalan numuneler üzerinde yapılan basınç mukavemeti deney sonucu Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Donma çözünme sonrası ölçülen basınç dayanımları

Karışım No	Karışımdaki Katkı Oranları	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Standart Sapma	Ortalama (MPa)
K8	%1KÖA %1HP	0.39	0.32	0.50	0,09	0.40
K9	%2KÖA %1HP	0.35	0.31	-	0,02	0.33

Tablo 4.5 de K8 nolu karışımın ortalama basınç dayanımı 0,37 MPa ve K9 nolu karışımın ortalama basınç dayanımı 0,45 MPa olarak verilmiştir. Durabilite deneyi sonrasında yapılan basınç mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.6 ile karşılaştırıldığında K8 nolu karışımın basınç dayanımında 0,03 MPa artış, K9 nolu karışımın basınç dayanımında 0,12 MPa düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Aradaki farklar incelendiğinde %1KÖA%1HP katkılı K8 nolu karışım durabilite deneyi sonrasında basınç dayanımında azda olsa artış olduğu, %2KÖA%1HP katkılı K9 nolu karışımda ise düşüş olduğu ancak durabilite deneyi sonrasında yapılan basınç mukavemeti deney sonuçlarına göre K8 ve K9 nolu karışımlar SGAS için hedeflenen mukavemet değerlerini sağladığı

anlaşılmaktadır. Geopolimer hafif karışımların durabilite deneyi öncesi ve sonrasında ölçülen basınç mukavemeti değişimleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Donma-çözünme etkisinde K8 ve K9 numunesinin basınç mukavemetindeki değişimi

Hafif geopolimer karışımları üzerinde yapılan deney sonuçlarını toparlayacak olursak;

- K1 nolu KÖA%0HP%0 oranlı karışımda basınç mukavemeti 27,23 MPa, yoğunluğu $1456,53 \text{ kg m}^{-3}$, su emilimi %21,79, boşluk oranı %32,1 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K2 nolu KÖA%1HP%0 karışımında 20 gr KÖA eklenmiştir. Bu karışımda basınç mukavemeti 11,68 MPa, yoğunluğu $1248,53 \text{ kg m}^{-3}$ su emilimi %26,68, boşluk oranı %33,30 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K3 nolu KÖA%2 HP%0 karışımında 40 gr KÖA katkısı eklenmiştir. Bu karışımda basınç mukavemeti 2,7 MPa, yoğunluğu $707,96 \text{ kg m}^{-3}$, su emilimi %64,86, boşluk oranı %45,35 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir. Katkılar dökülmesinden itibaren hamurun köpürdüğü görülmüş ancak hacimsel olarak fazla bir artışın olmadığı gözlemlenmiştir.
- K4 nolu KÖA%0 HP%0,5 karışımında sadece 10 gr HP eklenmiştir. Karıştırma esnasında hamurunun rengi koyu bir hal almıştır. Bu karışımda

basınç mukavemeti 22,98 MPa, yoğunluğu 1329,28kg m⁻³, su emilimi %20,61, boşluk oranı %30,12 geopolimer bir malzeme üretilmiştir.

- K5 nolu KÖA%1 HP%0,5 karışımında 20 gr KÖA, 10 gr HP eklenmiş mikser ile karıştırma yapılmasından itibaren köpürmeye başlamıştır. Bu karışımında basınç mukavemeti 2,16 MPa, yoğunluğu 697,61 kg m⁻³, su emilimi %66,60, boşluk oranı %45,75 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K6 nolu KÖA%2 HP%0,5 karışımında 40 gr KÖA, 10 gr HP eklenmiştir. Üretilen sertleşmiş geopolimer malzeme yakından bakıldığında köpürme nedeniyle oluşan boşluklar görünmektedir. Bu karışımında basınç mukavemeti 2,02 MPa, yoğunluğu 503,81 kg m⁻³, su emilimi %106,06, boşluk oranı %55,48 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K7 nolu KÖA%0 HP%1 karışımında sadece 20 gr HP eklenmiştir. Karıştırma esnasında hamur koyu bir renk alarak köpürmeye başlamıştır. Kalıba dökülmeden önce yakından dinleme yapıldığında köpürme sesleri duyulmuş fakat etüve koyulduktan sonra geri sönme olmuştur. Bu karışımında basınç mukavemeti 38,99 MPa, yoğunluğu 1270,56 kg m⁻³, su emilimi %23,45, boşluk oranı %30,42 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K8 nolu KÖA%1 HP%1 karışımında 20 gr KÖA ve 20 gr HP eklenmiştir. Karıştırma esnasında fazlaca köpürmeye başlamıştır. Etüve koyulduktan yarım saat sonrasında kalıptan taşmaya başlamış fark edildikten sonra taşan kısımlar kalıp üzerinden alınarak silindir kalıplara yerleştirilmiştir. Bu karışımında basınç mukavemeti 0,37 MPa, yoğunluğu 306,20 kg m⁻³, su emilimi %187,88, boşluk oranı %64,63 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K9 nolu KÖA%2 HP%1 karışımında 40 gr KÖA, 20 gr HP eklenmiştir. Karışım esnasında tıraş köpüğü kıvamında olduğu görülmüştür. Bu karışımında basınç mukavemeti 0,45 MPa, yoğunluğu 275,77 kg m⁻³, su emilimi %215,64, boşluk oranı %70,81 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.

- K10 nolu KÖA%0 HP%1,5 karışımında 30 gr HP eklenmiştir. Bu karışımında basınç mukavemeti 17,69 MPa, yoğunluğu $1198,93 \text{ kg m}^{-3}$, su emilimi %23,94, boşluk oranı %32,24 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K11 nolu KÖA%1HP%1,5 karışımında 20 gr KÖA, 30 gr HP eklenmiştir. Karıştırma esnasında köpürmeye başlamıştır. Bu karışımında basınç mukavemeti 0,22 MPa, yoğunluğu $218,44 \text{ kg m}^{-3}$, su emilimi %193,55, boşluk oranı %66,73 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.
- K12 nolu KÖA%2HP%1,5 karışımında 40 gr KÖA, 30 gr HP eklenmiştir. Bu karışımında basınç mukavemeti 0,11 MPa, yoğunluğu $216,72 \text{ kg m}^{-3}$, su emilimi %243,15, boşluk oranı %74,43 olan geopolimer bir malzeme üretilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında termik santral atığı olan F sınıfı uçucu külleri değerlendirerek geopolimer hafif malzeme üretilip SGAS olarak kullanılabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır. Bu amaçla uçak lastik tekerleklerinin üretilen havaalanı pist kaplaması içine gömülüp ilerleyebilmesini ve böylece enerji kaybederek yavaşlamasını sağlayacak maksimum hafif geopolimer malzemenin mukavemet değeri uçak lastik basınçları dikkate alınarak 1 MPa hedeflenmiştir. Geopolimer hamur numuneleri elde etmek için karışımlarda toz malzeme olarak UK, SD ve KAÇ kullanılmıştır. Bu malzemelerin aktivasyonunda kullanılan alkali çözeltinin teşkilinde ise SS ve 10 Molar SH 2/1 oranında kullanılmıştır. Hazırlanan taze geopolimer hamurun içinde hava boşlukları oluşturmak için %0, %1, %2 KÖA ve %0, %0,5, %1, %1,5 HP karışım ağırlığı oranınca ilave edilmiştir. Hazırlanan 2*2*2 cm³ ve 4*4*4 cm³ lik küp numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yürütülerek boşluk oranı, su emme kapasitesi, birim hacim ağırlık, basınç mukavemeti ve durabilite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- KÖA oranı %0 olan hafif geopolimer karışımlarda HP oranı artışıyla basınç mukavemetinde bir azalış trendi gözlemlenmiştir. KÖA içermeyen numunelerde en düşük mukavemet değeri HP en yüksek olduğu karışımda gözlemlenmiştir.
- KÖA oranının %0 olduğu K1, K4, K7 ve K10 nolu serilerde değişen oranlarda HP eklendiğinde az miktarda kabarma olmuş fakat sonrasında geri çökme gerçekleşmiştir. KÖA kullanılmayan HP' nin bulunduğu karışımların üretimi esnasında köpürdüğü ve sıcak etüve aktarıldıktan sonra hacim artışının ilk yarım saat içinde hızlanarak gerçekleştiği ancak hemen ardından karışımların sönerek çöktüğü gözlemlenmiştir.
- HP in bulunduğu KÖA bulunmayan karışımların siyaha yakın bir renkte olduğu gözlemlenmiştir. Renk değişimi geopolimerizasyonun oluşma seviyesi ve kristal yapıdaki değişimden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

- KÖA oranı %0 da sabit tutulduğunda HP oranı artırıldığında karma esnasında köpürdüğü gözlenmiş olsa da sertleşme sırasında çökme olmuştur. Bu sebeple HP karışım içindeki oranı ne kadar artırılsa da istenilen seviyede köpürme gerçekleşmemiştir. Ayrıca KÖA %0 da sabit tutulup %0,5, %1 ve %1,5 oranlarda HP eklenen karışımların renk olarak siyahi tonda koyu renklerde olduğu görülmüştür.
- HP oranı %0 da sabit tutulup KÖA oranı artırıldığında karma esnasından itibaren azda olsa köpürme gerçekleştirmiş fakat beklenen seviyeye çıkmamıştır. Bunun sonucunda karışım içerisinde HP ve KÖA yalnız başlarına kullanılması köpürme için yeterli olmayacağı anlaşılmıştır.
- HP' nin %0 olduğu K1, K2 ve K3 nolu serilerde KÖA oranına göre azda olsa kabarma görülmüş ancak KÖA' nın %0 olup değişen oranlarda HP bulunan sertleşmiş karışımlarda kabarma olmamıştır.
- En fazla köpüren karışımlar karma esnasında köpürmeye başlamış ve etüve koyulduktan 30 dk sonrasında fazlasıyla köpürmeye başlamıştır. En fazla köpürme K8, K9, K11 ve K12 nolu seride olmuş K8 nolu seri etüvde kalıptan taşıdığı için K11 ve K12 nolu karışımların her biri yarı yarıya 2 kalıba dökülerek önlem alınmıştır.
- K1, K4, K7 ve K10 nolu karışımlar değişim başlangıcı olduğundan üzerinde yapılan basınç dayanımı ve yoğunluk deneylerinde en yüksek oranlar görülmüş, su emilimi ve boşluk oranı deneylerinde ise en düşük oranlar görülmüştür.
- Boşluk oranı ve su emme oranı arasında doğru orantı olduğu tespit edilmiştir.
- En yüksek boşluk oranı ve su emilimi mukavemetin en düşük olduğu KÖA %2 HP %1,5 olan K12 nolu seride görülmektedir.
- Boşluk oranı ve su emme oranı arttıkça mukavemet ve yoğunlukta düşüş olduğu için aralarında ters orantı olduğu anlaşılmıştır.

- Tek başına farklı oranlarda kullanılan KÖA ve HP nin beklenen köpürmeyi sağlayamadığı, her iki katkının birlikte kullanılması durumunda sinerjik etki oluşarak istenilen köpürme sağlandığı görülmüştür.
- Mukavemet değeri olarak hedeflenen 0,35 MPa ile 1MPa aralığında %1KÖA%1HP oranına sahip K8 ve KÖA%2HP%1 oranına sahip K9 numaralı karışımların bu aralıkta olduğu görülmüştür. K8 ve K9 numaralı serilerde sırasıyla 0,37 MPa ve 0,45 MPa değerleri ölçülmüştür. K8 ve K9 numaralı karışımların yoğunlukları incelendiğinde sırasıyla $306,20 \text{ kg m}^{-3}$ ve $275,77 \text{ kg m}^{-3}$ olduğu bu yoğunlukların hedeflenen 600 kg m^{-3} altında yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir.
- K8 ve K9 nolu karışımlar hedeflenen mukavemet, yoğunluk değerlerini sağladığı için SGAS olarak kullanılabilirliğinin tespiti için durabilite deneyi yapılmıştır. Suda donma çözünme deneyi sonunda K9 nolu karışımlar, K8 nolu karışımlara göre daha fazla dağıldığı ve ayrıştığı gözlenmiştir. Geometrisi bozulmayan numunelere yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda karışımların genel olarak özelliklerini koruduğu belirlenmiştir. SGAS olarak kullanılması durumunda drenaj önlemlerinin alınması ve yüzeye geçirimsiz bir kaplama uygulanması gerekmektedir.
- K8 ve K9 nolu karışımlara yapılan deneyler sonucunda 0,37 MPa (54 psi) 0,45 MPa (65 psi) olarak bulunan basınç mukavemeti dayanımları Kuloğlu, Özdemir ve Kök (2007) yaptıkları çalışmada uçak lastik basınçları için belirttikleri 0,52 MPa (75 psi) ve 1,38 MPa (200 psi) değerler ile karşılaştırıldığında bahse konu karışımların pisten aşan tüm uçakların lastikleri altında ezilerek, yavaşlatıp durmalarını sağlayabilecek, ARFF araçlarının uçak müdahalesi için üzerine çıktığında ise batmayacak mukavemete sahip olduğu anlaşılmaktadır. Literatür taramasında GP nin SGAS için hazırlanan şartnamedeki şartları taşıdığından da yola çıkılarak bu karışımların SGAS için kullanılacak farklı bir alternatif olduğu anlaşılmaktadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışma sonrası elde edilen veriler doğrultusunda gelecek çalışmalarda dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır:

- Çalışmada elde edilen veriler geopolimer malzemelerin SGAS olarak kullanılabilirliği açısından umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte uygulamada kullanılacak optimum karışım kombinasyonunun belirlenmesi için çalışmanın farklı geopolimer bağlayıcı türleri için kür şartları, alkali çözelti türü, molarite, toz malzeme çeşidi ve oranı gibi faktörler dikkate alınarak ilave araştırmalar ile geliştirilmesi önerilmektedir.
- Köpüren karışımların standart genişlik, derinlik ve yükseklik değerleri olamayacağından üretim yapılan sertleşmiş ana malzemedan kesimler yapılarak küp numuneler oluşturulabilmektedir. Numunelerin yoğunluklarının düşük olması ve içlerinde baloncuklar halinde bulunan boşlukların fazla olması nedeniyle kesme işlemi esnasında dağılmalar olmuş, aynı seri içerisinde bile aynı küp numuneler oluşturulmasında zorluk yaşanmıştır. İnce başlıklı bir spiral ile tek seferde düzgün kesimler yapabilecek yöntem bulunmalıdır.
- Boşluk oranı fazla olan numunelerin basınç mukavemeti ölçümü sırasında kırılma olmadan bir süre ezildiği bu esnada grafik olarak veri alınmadığı gözlemlendiğinden farklı basınç mukavemet ölçümleri araştırılmalıdır.
- Kalıptan taşan geopolimer malzemenin kalıp içerisinde kalan malzemedan farklı yoğunluk, basınç mukavemeti, boşluk oranı ve su emme oranına sahip olabileceği düşünüldüğünden üretim için farklı metotlar geliştirilmelidir.
- Deneyler sırasında üretilen geopolimer hamurun metal ürünlere yapıştığı kuruduktan sonra temizlenmesinin çok zor olduğu gözlenmiştir. Etüve konulduktan sonra kalıptan taşarak etüvün içinde kuruyan geopolimer hamurun sertleşme sonrasında temizlenemediğinden yola çıkılarak numunelerin etüve koyulmadan önce büyük poşetlere koyulması bu sayede taşan karışımın poşetin içinde kalarak etüve yapışması engellenecektir.

KAYNAKLAR

- 1001crash., 2015.**Commercial aviation accidents statistics - Causes.** 1001crash.
<https://www.1001crash.com/index-page-statistique-lg-2-numpage-4.html> Erişim Tarihi (12.12.2022)
- Altındal, İ. (2020). **Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi.** Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Amran, M., Huang, S.-S., Debbarma, S. ve Rashid, R. S. M. (2022). **Fire resistance of geopolymers concrete: A critical review.** Construction and Building Materials, 324, 126722.
- Anonim. 2016. **Plane With Mike Pence Aboard Skids Off La Guardia Runway.** New York Times. <https://www.nytimes.com/2016/10/28/us/plane-with-mike-pence-aboard-skids-off-la-guardia-runway.html#:~:text=A%20plane%20carrying%20Gov.,as%20the%20plane%2C%20carrying%20Mr> Erişim Tarihi (12.12.2022)
- Antaki, A. ve Wahhab, T. S. (2020). **Pomza katkılı normal ve hafif betonların kimyasal durabilitesinin incelenmesi.** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Bakharev, T. (2005). **Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions.** Cement and concrete research, 35(6), 1233–1246.
- Binici, H., Eken, M. ve Aksoğan, O. (2012). **Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri.** Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8(2), 12–25.
- Çelikten, S. ve Atabey, İ. İ. (2021). **Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi.** Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 328–332.
- Çelikten, S. ve Canbaz, M. (2020). **Yüksek sıcaklığa maruz atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçların davranışı.** Pamukkale Üniversitesi

Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(6), 1110–1116.

CIA. 2021. **Airports. Central Intelligence Agency.** <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/airports/> Erişim Tarihi (10.11.2022)

DHMI. 2021a. **İstatistikler.**Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx> adresinden erişildi.

DHMI. 2021b. **Faaliyet Raporu.**Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. [https://www.dhmi.gov.tr/Lists/FaaliyetRaporlari/Attachments/22/Faaliyet_Raporu-31.05.2021web\(3\).pdf](https://www.dhmi.gov.tr/Lists/FaaliyetRaporlari/Attachments/22/Faaliyet_Raporu-31.05.2021web(3).pdf) Erişim Tarihi (31.10.2022)

Dündar, B., Çınar, E. ve Peşin, S. (2020). **Bazalt ve Karbon Lif Takviyeli Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması.**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(4), 1039–1048.

Durlanık, S. (2003). **Hava Alanı Pistlerinde Temel Dolgusunun Geosentetik İle Donatılması.** Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ecer, S. ve Ay, G. (2009). **Hava Taşıtı Kazalarını Önlemede Yeni Gelişmeler.**Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi, 4(1).

Edwards, D. (2006). **Engineered Material Arresting Systems.**Aerosafety Systems.

Erkmen, K. C. (2018). **Hydration behavior and strength development of mineral admixture incorporated calcium aluminate cements.** Middle East Technical University.

FAA. 2002. **Federal Aviation Administrator Archive.** Federal Aviation Administrator. <https://www.faa.gov/> Erişim Tarihi (29.11.2022)

FAA. 2018. Soft **Ground Arrestor System.**Federal Aviation Administrator. <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Safety/Runway-Surface-Safety-Technology/Soft-Ground-Arrestor-System> Erişim Tarihi (09.11.2022)

FAA. 2022. **Runway Excursions.**Federal Aviation Administrator. https://www.faa.gov/airports/runway_safety/excursion Erişim Tarihi (10.06.2022)

- FAA. 202. **Engineered Material Arresting System (EMAS)**.Federal Aviation Administrator. <https://www.faa.gov/newsroom/engineered-material-arresting-system-emas-0> Erişim Tarihi (24.04.2022)
- Heymsfield, E. (2021). **Investigating the potential of using glass foam for an EMAS material to mitigate aircraft overrun accidents**. International Journal of Pavement Engineering, 22(7), 807–821.
- Ho, C.-H. ve Romero, P. (2009). **Investigation of existing engineered material arresting system at three US Airports**.
- ICAO. (2005). **List of working and information papers**.International Civil Aviation Organization, 11–14.
- Kalaycıklı, İ. E. (2020). **Farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi**. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karaaslan, C. (2021).**Su yapılarında kullanılabilir pomza esaslı geopolimer betonların geliştirilmesi**. Doktora Tezi,Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaya, M. (2021). **Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi**.Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 640–647.
- KGM. 2022. **KGM Tarihçe**.Karayolları Genel Müdürlüğü. <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/tarihce.aspx#:~:text=Karayolları Genel Müdürlüğü%3B> Erişim Tarihi (20.09.2022)
- Kök, E. (2008). **Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları**.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuloğlu, N., Özdemir, M. A. ve Kök, B. V. (2007). **Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Metodlarının Değerlendirilmesi**. Ulaştırma Kongresi, İstanbul.
- Kurtuluş, C. (2018). **Uçucu kül esaslı geopolimer köpük beton özelliklerinin geliştirilmesi**. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Liang, G., Zhu, H., Li, H., Liu, T. ve Guo, H. (2021). *Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer*. Construction and Building Materials, 293, 123486.
- Lingyu, T., Dongpo, H., Jianing, Z. ve Hongguang, W. (2021). *Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review*. Reviews on Advanced Materials Science, 60(1), 1–14.
- Luhar, S., Nicolaides, D. ve Luhar, I. (2021). *Fire resistance behaviour of geopolymer concrete: An overview*. Buildings, 11(3), 82.
- Marisetty, S. C., Bailey, E. D., Hale, W. M. ve Heymsfield, E. P. (2008). Development of a soft ground arrestor system. United States. Dept. of Transportation.
- Mohseni, E. (2018). *Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites*. Construction and Building Materials, 186, 904–911.
- Özçelik, Y. ve Şimşek, O. (2022). *Köpük beton üretiminde inşaat yıkıntı atığı ince agregası kullanımı ve optimum su/çimento oranının belirlenmesi*. Politeknik Dergisi, 1-1.
- Özdemir, S., Sacar, Ö. ve Özcan, E. (2021). *Dijkstra algoritması kullanılarak ipek yolu koridorları arasında en kısa ulaştırma güzergâhının belirlenmesi*. Demiryolu Mühendisliği, (13), 97–105.
- Özkalay, C. (2019). *Pilot kurtarma araçlarına hareket platformu kazandırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk Yarar, D. (2021). *Polipropilen lif ile güçlendirilmiş köpük betonlarda taban külünün hafif agrega olarak kullanımının araştırılması*. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pirazhn, G. M. M. (2016). *Effect Of Molarity Of Naoh On Strength Of Geopolymer Mortar*. Doktora Tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Posi, P., Ridtirud, C., Ekvong, C., Chammanee, D., Janthowong, K. ve Chindaprasirt, P. (2015). *Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes*

- containing recycled packaging foam***.Construction and Building Materials, 94, 408–413.
- Rangan, B. V. (2014). ***Geopolymer concrete for environmental protection***. The Indian concrete journal, 88(4), 41–59.
- Raveendran, G. ve James, S. C. (2017). ***Strength Characteristics of Cement-Coir Pith Composite and Cement-Coir Pith-Glass Powder Composite: Soft ground Arresting System***.International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(4), 1779–1783.
- Runwaysafe. 2022. ***Runway Safe***.Runway Safe. <https://runwaysafe.com/> Erişim Tarihi (31.12.2022)
- Sanjayan, J. G., Nazari, A., Chen, L. ve Nguyen, G. H. (2015). ***Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer***.Construction and Building Materials, 79, 236–244.
- Santagata, E., Bassani, M. ve Sacchi, E. (2010). ***Performance of new materials for aircraft arrestor beds***.Transportation research record, 2177(1), 124–131.
- Sayın, N. (2022). ***Hafif beton atıklarının geri dönüşüm malzemesi olarak beton teknolojisinde kullanımının araştırılması***. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Shahmansouri, A. A., Nematzadeh, M. ve Behnood, A. (2021). ***Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method***.Journal of Building Engineering, 36, 102138.
- SHGM. 2021. İstatistikler. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. <https://web.shgm.gov.tr/tr/kurumsal/4547-istatistikler> Erişim Tarihi (26.12.2022)
- şinik, O. (2019). ***Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması***. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Steyn, W. J., Lombard, S. ve Horak, E. (2016). ***Foamed concrete-based material as a soft ground arresting system for runways and airfields***.Journal of Performance of

Constructed Facilities, 30(1), C4014006.

- Tamer, Ş. (2021). *Havacılıkta insan faktörünün uçak kazalarına etkisinin incelenmesi: Tenerife uçak kazası örneği*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Tokay, H. (2019). *Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Topçu, İ. B. ve Sofuoğlu, T. (2020). *Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi*. El-Cezeri, 7(2), 806–823.
- TÜİK. 2021. Türkiye’de Bulunan Motorlu Araç Sayısı. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Erişim> Tarihi (10.12.2022)
- Tuyan, M., Soykan, K. S., Namal, İ. ve ÇAKIR, Ö. A. (2020). *Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması*. Politeknik Dergisi, 23(2), 311–320.
- Vikipedi. 2021. *Türkiye’deki havacılık kazaları ve olayları listesi*. Vikipedi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Türkiye%27deki_havacılık_kazaları_ve_olayları_listesi Erişim Tarihi (04.12.2022)
- Vikipedi. 2022. *Runway excursion*. Vikipedi. https://en.wikipedia.org/wiki/Runway_excursion Erişim Tarihi (01.12.2022)
- Youssef, T., Elsayed, Y., Elsayed, T. A. ve Lawaty, S. M. (2021). *Investigation of foamcrete mechanical and physical properties*. International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology içinde (C. 19, ss. 1–11). The Military Technical College.
- Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, Z. Q. ve Yang, J. L. (2015). *Improving safety of runway overrun through foamed concrete aircraft arresting system: An experimental study*. International journal of crashworthiness, 20(5), 448–463.