



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİNERAL KATKI VE METAL CÜRUFU İLE
ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI
ENJEKSİYON ŞERBETLERİNİN
KARAKTERİZASYONU

Ali YÖNEL

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali YÖNEL, tarafından hazırlanan “Mineral Katkı ve Metal Cürufu ile Zenginleştirilmiş Çimento Esaslı Enjeksiyon Şerbetlerinin Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 29/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
(Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Murat SAYDAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ali YÖNEL

Tarih:29/08/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

MINERAL KATKI VE METAL CÜRUFU İLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI ENJEKSİYON ŞERBETLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Ali YÖNEL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
2.Danışman : Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU

2025, 82 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Dr. Öğr. Üyesi Murat SAYDAN

Birçok yapıda yeraltı suyu yapı güvenliği bakımından önemli problemler meydana getirmektedir. Yeraltındaki su sızıntılarına karşı yapıların güvenliğinin sağlanması amacı için en sık başvurulacak yöntem yapıların zeminlerine, su yapılarında ise, yapının su ile temas eden gövde kısımlarına enjeksiyon uygulamalarıdır. Bu çalışma kapsamında, çimento esaslı enjeksiyon şerbetlerinde kullanılan çimento miktarını azaltarak çimento yerine ikame edilebilecek metal cürufu, uçucu kül ve doğal puzolan kullanılması araştırılmıştır. Çimento kullanımının azalması çimento üretiminde meydana gelen karbon salınımının düşürülmesi ve atık sanayi ürünlerinin kullanımı ile ekonomik fayda sağlanması amaçlanmıştır. İlk olarak metal cürufu, uçucu kül ve doğal puzolan çimento içerisinde tek olarak sırasıyla ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında çimento yerine ikame edilip, basınç, viskozite ve çökelme deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneyler ile hazırlanan numunelerin dayanım, akışkanlık ve çökelme değişimleri hesaplanmış çıkan sonuçlar Taguchi Yöntemi kullanarak üç malzemenin aynı anda kullanıldığı optimumum karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan enjeksiyon şerbeti karışımları basınç dayanımı, marsh hunisi, çökelme, geçirimsizlik, priz başlangıç ve priz sonu deneylerine tabi tutulmuş çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında metal cürufu akışkanlığı ve çökelmeyi arttırdığı, uçucu kül ve doğal puzolanın çökelmeyi ve akışkanlığı azalttığı belirlenmiştir. Her üç malzemenin de kullanımı arttıkça basınç dayanımında düşüşler görülmüştür. Taguchi Yöntemi kullanılarak hazırlanan enjeksiyon şerbeti karışımlarında çimento miktarının %7,5 oranında UK,%5 oranında doğal puzolan ve %2,5 oranında metal cürufu ikame edilmesi ile istenilen sonuçların alınabileceği saptanmıştır. Uçucu külün priz bitiş süresini uzatıp başlangıç süresini kısalttığı, doğal puzolanın priz başlangıç ve bitiş süresini uzattığı metal cürufunun ise priz başlangıç ve bitiş süresine etki etmediği saptanmıştır. Hem en iyi geçirimsizlik sonucu verecek hem de çimento yerine en fazla ikame malzeme kullanılabilecek enjeksiyon şerbeti karışımının %5 UK, %7,5 doğal puzolan ve %2,5 metal cürufu ikame ederek hazırlanan K5UK7,5P2,5M şerbet karışımının olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre UK, doğal puzolan ve metal cürufu kullanarak optimum nihai enjeksiyon karışımları ile elde edilen verilere göre çimento enjeksiyon şerbetlerinde çimento yerine %7,5 UK, %5 P, %2,5 M ikame edilerek toplamda %15 oranında ikame malzeme kullanılabileceği bundan dolayı çimentonun miktar olarak %85 oranına kadar düşürülebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal Cürufu, Uçucu Kül, Doğal Puzolan, Enjeksiyon

ABSTRACT

MS THESIS

CHARACTERIZATION OF CEMENT-BASED INJECTION GLATS ENRICHED WITH MINERAL ADDITIVES AND METAL SLAG Ali YÖNEL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor : Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
2. Advisor : Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU**

2025, 82 Pages

**Jury
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Dr. Murat SAYDAN**

Groundwater poses significant problems in many structures regarding structural safety. The most frequently used method to ensure the safety of structures against underground water leaks is injection into the foundations of structures, and in water-based structures, into the body parts of structures that come into contact with water. This study investigated the use of metal slag, fly ash, and natural pozzolan as substitutes for cement by reducing the amount of cement used in cement-based grouts. The aim was to reduce cement consumption, reduce carbon emissions from cement production, and generate economic benefits through the use of waste industrial products. Initially, metal slag, fly ash, and natural pozzolan were substituted for cement in cement at 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight, respectively. Pressure, viscosity, and sedimentation tests were conducted. The strength, fluidity, and sedimentation changes of the prepared samples were calculated based on the results. Optimum mixtures were prepared using the Taguchi Method using the three materials simultaneously. The prepared grout mixtures were subjected to compressive strength, marsh funnel, sedimentation, impermeability, initial setting, and final setting tests, and the results were compared. Based on the results, it was determined that metal slag increased fluidity and sedimentation, while fly ash and natural pozzolan decreased sedimentation and fluidity. Decreases in compressive strength were observed as the use of all three materials increased. It was determined that the desired results could be achieved by substituting 7.5% FA, 5% natural pozzolan, and 2.5% metal slag for the cement in grout mixtures prepared using the Taguchi Method. Fly ash prolonged the initial setting time and shortened the final setting time, while natural pozzolan extended the initial and final setting times, while metal slag had no effect on the initial and final setting times. The grout mixture K5UK7.5P2.5M, prepared by substituting 5% FA, 7.5% natural pozzolan, and 2.5% metal slag, was determined to provide the best impermeability results and utilize the highest amount of substitute materials in place of cement. Based on the results obtained, and the data obtained from the optimum final grout mixtures using FA, natural pozzolan, and metal slag, it was determined that a total of 15% substitute materials could be used by substituting 7.5% FA, 5% P, and 2.5% M for cement in the grouts. This could reduce the cement content to up to 85%.

Keywords: Metal Slag, Fly Ash, Natural Pozzolan, Injection

ÖNSÖZ

Tez çalışmam ve sosyal hayatımda bana yol gösteren, değerli katkılarını ve desteklerini benden esirgemeyen danışmanım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e teşekkür, şükran ve saygılarımı sunarım.

Çalışmama büyük katkıları olan, bu çalışmamda bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ikinci danışmanım, Sayın Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU'ya şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez ve diğer çalışmalarım süresince benden her türlü yardımı esirgemeyen, Sayın Arş. Gör. Furkan TÜRK'e çok teşekkür ederim.

Çalışmam ve eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve her daim yanımda olan kıymetli babam Mehmet YÖNEL ve kıymetli annem Hatice YÖNEL'e kardeşlerim Aziz Berk YÖNEL ve Tansel YÖNEL'e sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Ali YÖNEL
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Metal Cürufun Kullanım Alanları	2
1.2. Uçucu Külün Kullanım Alanları.....	4
1.3. Araştırmanın Özgün Değeri	4
1.4. Araştırmanın Hedefi	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Uçucu Kül Kullanımı.....	8
2.2. Doğal Puzolan Kullanımı	12
2.3. Metal Cürufu Kullanımı	13
2.4. Bentonit Kullanımı	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1. Malzemeler	20
3.1.1. Metal Cürufu.....	20
3.1.2. Çimento	22
3.1.3. Uçucu kül.....	22
3.1.4. Doğal puzolan.....	24
3.1.5. Bentonit	25
3.2. Yöntem	26
3.2.1. Malzemelerin ve şerbet karışımlarının hazırlanması.....	26
3.2.2. Karışımlara yapılan testler.....	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	39
4.1. Puzolanik Aktivite Sonuçları.....	39
4.2. Marsh Hunisi Deneyi Sonuçları	40
4.3. Çökelme Deneyi Sonuçları	46
4.4. Priz Başlangıç ve Priz Bitim Süresinin Tayini Sonuçları.....	51
4.5. Basınç Deneyi Sonuçları	53
4.6. SEM Analiz Sonuçları	58
4.7. Beton Geçirimsizlik Deneyi Sonuçları	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
5.1 Sonuçlar	63
5.2 Öneriler	65

KAYNAKLAR.....	66
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CaO	:Kalsiyum oksit
C ₃ S	:Tri-kalsiyum Silikat
C ₃ A	:Tri-kalsiyum Alüminat
C ₂ S	:Di-kalsiyum Silikat
SiO ₂	:Silisyum Dioksit
C ₄ AF	:Tetrakalsiyum Aluminoferrit
S	:Kükürt
F	:Flor
Al ₂ O ₃	:Alüminyum Oksit
H ₂ SO ₄	:Sülfürik Asit
NaOH	:Sodyum Hidroksit
Ca(OH) ₂	:Kalsiyum Hidroksit
μ	:Mikron (Mikrometre)
PO ₄ ³⁻	:Fosfat

Kısaltmalar

UK	:Uçucu Kül
LL	:Likit Limit
PI	:Plastisite İndeksi
UCS	:Doğrulanmamış Basınç Dayanımı
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi
CH	:Yüksek Plastisiteli Kil
OH	:Organik Yüksek Plastisiteli Kil
CL	:Düşük Plastisiteli Kil
CBR	:Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi
LA	:Los Angeles
NSA	:Amerika Ulusal Cüruf Birliği
DDY	:Devlet Demir Yolları
M	:Metal Cürufu
DSİ	:Devlet Su İşleri
P	:Puzolan
MH	:Yüksek Plastisiteli Siltli Kil
TSE	:Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X Işını Kırınım Yöntemi
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi
S/N	: Sinyal-gürültü oranı

1. GİRİŞ

Su yapıları, tüneller, konut yapıları gibi birçok yapı alanlarının inşası sırasında inşaat alanlarında karşılaşılan problemlerin başında yeraltı suları ve bunların yapılara olan olumsuz etkileri gelmektedir. Bu problemlerin çözülmesi için mühendislik çözümler aranmaktadır. Hem tünellerde, hem barajlarda, hem de su iletim hatlarında karşılaşılan yer altı suyuna karşı farklı enjeksiyon türleri denenmekte ve bu enjeksiyonlar sayesinde yapının güvenliği ve suyun geçirimsizliği hedeflenmektedir.

Enjeksiyonunu uygulama yöntemi mühendislik parametrelerin iyileştirilmesinde etkin rol oynamaktadır. Yapılan bu uygulamalar zeminlerin kayma mukavemetlerinin ve taşıma kapasitelerinin artırılması, zeminlerin oturma davranışlarının kısıtlanması, erozyon tehlikesinin önlenmesi, tünel kaplaması ile kayaç arasındaki boşlukların doldurulması ve baraj yapılarının temel ve gövdelerindeki geçirgenliği azaltarak, sızıntı miktarının düşürülmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan enjeksiyon uygulamaları sayesinde yapıların oturduğu zeminlerin yaklaşık 27 kata kadar daha az geçirimli hale geldiği tespit edilmiştir (Şişman, 2021).

İlerleyen teknoloji sayesinde çeşitli enjeksiyon türleri uygulanmakta ve uygulanan enjeksiyonlar için hazırlanan şerbetlerde farklı türde malzemeler kullanılmaktadır. Genellikle çimento su ve bentonit malzemeleri kullanılarak hazırlanan enjeksiyon şerbetlerinin içinde malzeme miktarları ve oranları kullanılacak zeminler ve farklı yapı özelliklerinden dolayı değişmektedir. İhtiyaç duyulması halinde akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı gibi katkı malzemeleri de kullanılmaktadır.

Yapılarda yeraltı suyunun etkisini kaldırmak ve yapının maruz kaldığı statik projelerde istenilen basınç dayanımını sağlamak için yapılara enjeksiyon işlemi yapılmaktadır. Çimentonun kullanıldığı her yerde olduğu gibi çimento bazlı enjeksiyon şerbetleri de karbon salınımını artırmakta ve çevresel olumsuzluklar doğurmaktadır. Devletlerarası İklim Değişikliği Panelinin (Intergovernmental Panel for Climate Change – IPCC) en son çalışmalarına göre iklim tehdidine karşı olumlu eylemler için fırsat penceresi hızla kapanmaktadır. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde çimento kullanımı 2050 yılına kadar enerji ve işletme emisyonlarının %38'ini ve nihai enerji kullanımının %43'ünü karşılayacağı tahmin edilmektedir. Çimento fabrikaları dünya küresel ısınma ve iklimsel değişmeye etki eden dört ana emisyonu sahiptir. Bunlar toz, kükürt, azot oksitler ve karbondioksittir. Dünya çapında yılda yaklaşık 3,5 milyar ton sıradan portland çimentosu üretiliyor ancak üretilen her ton yaklaşık olarak 622 kg'a kadar

karbondioksit salmaktadır. Çimento endüstrisi küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %7'sine sebep olmaktadır (Paul ve ark.,2021).

Sanayinin ilerlemesi ile çeşitli sanayi kollarında meydana gelen atık malzeme çeşitleri ve miktarı da artış göstermektedir. Metal sektöründe üretimlerden kaynaklı oluşan metal cürufu bunun örneklerinden biridir. Lazer, CNC makinelerinin çalışması ile oluşan endüstriyel atık olarak meydana gelen metal cüruflar, hali hazırda döküm sanayisinde geri dönüştürülerek kullanılmaktadır. Metal cürufu döküm sanayisinde kullanımının yanı sıra su yalıtımı ve zemin stabilizasyonları işlerinde kullanılan uçucu kül, doğal puzolan gibi geri dönüştürülüp, su yalıtımı ve zemin stabilizasyonlarında kullanılarak düşük maliyetinden dolayı yapılan imalatlara ekonomik katkı sağlaması üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Atık malzemelerin geri dönüşüm olarak kullanılması hem ekonomik hem de çevresel olarak katkı sağlayacağı bir gerçektir. Bu hususta her sektörde olduğu gibi inşaat sektörü alanında da bilimsel çalışmalar yapılmakta ve endüstriyel atık malzemelerin kullanım alanının geliştirilmesi için çaba sarf edilmekte ve yeni kullanım alanları oluşturulmaya çalışılmaktadır.

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda çimento yerine ikame malzemesi olarak kullanılan malzemeler tek olarak ikame edilmek yerine birden farklı malzeme ile aynı anda karıştırılarak kullanılmaktadır. Endüstriyel atık malzemesi ile doğal yapı malzemelerinin belli oranlarda karıştırılıp çimento içerisinde ikame malzeme olarak kullanılması çimento kullanımını azaltmasından ötürü hem ekonomik hem de çevresel etki olarak olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Araştırmalar çimento ile beraber kullanılan ikame malzemelerin dayanım, geçirimsizlik, viskozite gibi özellikleri açısından ikame malzeme kullanılmayan çimento ile aynı veya daha iyi sonuç verebilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

1.1. Metal Cürufun Kullanım Alanları

Metal Cürufu atık malzeme olup hem dayanım sağlayıp hem de ekonomik olmasından dolayı farklı alanlarda kullanımı araştırılmaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğü yapılan yol inşaatlarında alt temelde metal cürufunun dolgu olarak kullanılmasını uygun görmüş olup çelikhane cürufunun kullanımı için Türk Standartları Uygunluk belgesi almıştır. Cüruf yoğun ve sert bir malzemedir. Stabilitesinin yüksek olması sebebiyle ince asfalt kaplama tabakası serilmesine imkan sağlayabilmektedir. Cüruf tanelerinin köşeli yapıya sahip olması

sayesinde taneciklerinin bir biri ile iyi kenetlenmesi cürufun asfalt betonlarda kullanıp kalıcı deformasyona karşı direncini artırmaktadır.

Metal cürufu üzerinde yapılan kimyasal ve fiziksel deneyler sonucunda Portland çimentoya %20 oranında ikame edilmesiyle hazırlanan karışımlarda 28 günlük basınç dayanımlarından daha düşük en yakın sonuç verdiğini gözlemlenmiş olduğundan çimento yerine ikame edilebileceği belirtilmiştir (Türkiye Çelik Üreticiler Derneği, 2015).

Cüruf, demiryollarında balast malzemesi olarak kullanılabilir. Balast malzemesi demiryolu platformunun üzerine konulan traverslerin gömülü olduğu kırma taş tabakasıdır. Cürufun TSE ve DDY şartnamesine göre yapılan testlerde TS 7043 de belirtilen balast özelliklerini taşıdığını tespit edilmiştir (İTÜ TechnoBee, 2012).

Metal cürufun iyi donma ve korozyon direnci sayesinde deniz suyuna daldırıldığında yüzeyde bozulma olmadığı gözlemlenmiş olup, İSDEMİR tarafından yapılan çalışmalarda cürufun liman dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği araştırılmış İsdemir Limanı 2. Etap ve Dolgu Projesinde olumlu ÇED raporu alınarak 35 milyon tonluk dolgu malzemesinin 13 milyon tonu cüruftan temin edilmiştir (Türkiye Çelik Üreticiler Derneği, 2015).

2023 yılı dünyada çelik üretimi 1,8 milyar ton, ülkemizde ise 33,7 milyon ton üretilmiştir (Oyak Maden 2024). Ülkemizdeki 2022 ve 2023 yılı çelik-metal üretimi, tüketimi ihracat ve ithalat değerleri ile bunların yıllar içerisinde değişim oranları Çizelge 1.1’de gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında kullanmak için elde edilen metal cürufu lazer kesim cihazına yerleştirilen metal sac levhanın lazer kesim işleminden sonra metal levha ağırlığının yüzde biri ağırlığında ham metal cürufu olarak elde edilmiştir. Elde edilen ham halindeki cüruf öğütme ve elek işlemlerinden geçirilip elekten geçmiş hali ile enjeksiyon şerbeti karışımlarında kullanılmıştır. Öğütme ve elek işlemlerinden geçen ham metal cürufunun yüzde doksanı istenilen dane boyutuna düşmüş ve karışımlarda kullanılmıştır.

Çizelge 1.1.Türk Çelik Sektörü Üretim Miktarları (Oyak Maden 2024)

	2022	2023	Değ
Üretim	35134	33714	-4,0%
Tüketim	32522	38084	17,1%
İhracat	19581	14552	-25,8%
İthalat	18044	20298	12,5%

* tabloda verilen veriler 1000 milyon ton olarak ifade edilmektedir.

1.2. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Uçucu kül, ince daneli yapısı sayesinde beton üretimi kullanımında betonunun içinde meydana gelen çatlak oluşumunu azaltıp, işlenebilirliği arttırmaktadır. Çimento üretiminde de klinker yerine kullanılıp enerji tüketimini ve karbondioksit emisyonlarını azaltmakta olup iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlamaktadır.

UK atık malzeme olduğu için düşük maliyetlidir bundan dolayı tuğla ve seramik veya hafif yapı malzemeleri gibi sık kullanılan malzemelerin üretiminde ham madde olarak kullanılma özelliğine sahiptir. Uçucu kül, ham madde olarak kullanılabilirken, bazık yapısı sayesinde asidik toprağa eklendiğinde toprağın pH değerini yükselterek toprağı nötralize olasını sağlar. Böylece bitkilerden daha verimli besin alımını kolaylaştırır.

Ülkemizde UK kullanımı DSİ ve KGM başta olmak üzere bazı kamu kuruluşları tarafından kullanılmaktadır. DSİ tarafından barajlarda UK kullanımının denemesi için Eskişehir ilinde bulunan Porsuk ve Gökçekaya Barajları seçilmiş ve burada yapılan UK uygulaması sonucunda geçirimsizlik açısından olumsuz bir sonuçla karşılaşılmamıştır.

UK, doğal puzolan ile karıştırılıp, çimento yerine ikame edilerek yüksek dayanımlı beton üretmek için, su altı yapılarında (barajlar, köprüler, limanlar), endüstriyel zeminler ve yol yapımında kullanılmaktadır

1.3. Araştırmanın Özgün Değeri

Çimento ve metal cürufu karışımı, farklı tip zeminleri stabilize etmekte ve yapılarda kullanılan inşaat malzemelerinin daha yüksek verim ile kullanılmasında önemli avantajlar sağlar. Bu karışım, kilin ve doğal zeminin zayıf mekanik özelliklerini iyileştirir, doğal zeminin içerisindeki boşlukları doldurarak su geçirimsizliğini artırır ve

uzun vadeli dayanıklılık sağlar. Uçucu kül, doğal puzolan ve öğütülmüş metal cürufu karışımının kil veya alüvyon zeminlerde kullanımı, kilin mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan stabilizasyon uygulamalarında etkilidir. Bu tür karışım, tabii zeminin dayanıklılığını, mukavemetini artırmak ile birlikte aynı zamanda sülfat ve klor iyonlarına karşı direnç sağlayarak durabilite özelliklerini iyileştirmek yönünden katkı sağlayabilir. Bu çalışmada metal cürufu, uçucu kül ve doğal puzolan kullanılmış ve bu puzolanik malzemelerin ince taneli yapıları sayesinde uygulama alanında gözenekleri doldurması ve böylece yapılarda geçirimsizliği artırması hedeflenmiştir. Zeminlerde ve su yapılarındaki yapının gövdesi içindeki gözeneklerin doldurulması uzun vadeli dayanımında artmasını sağlayacaktır.

Klasik su-çimento karışımı ile hazırlanan enjeksiyon şerbetindeki çimento yerine uçucu kül, doğal puzolan ve metal cürufu kullanımı sayesinde ihtiyaç olunan çimento miktarının azaltılması ve böylece harç üretiminde kullanılan klinker miktarının azaltılarak meydana gelen CO₂ salınımının azaltılması hedeflenmiştir.

1.4. Araştırmanın Hedefi

Daha önceki çalışmalarda kil zeminleri stabilize etmek için belli oranlarda uçucu kül veya kireç katılarak gözlemler yapılmış kil ile uçucu kül ve kireç karışımlarının kilin yapısının güçlendirdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kireç kullanmayıp metal cürufu, uçucu kül ve doğal puzolanın sırayla çimento ile etkileşimine bakılıp bu malzemeleri optimum oranlarda karıştırarak killi ve alüvyonlu zeminlere enjekte edilebilirliği araştırılmıştır.

Uçucu külün kireç ile beraber kullanıldığında zeminde dayanım artışı sağlayacağı ve geçirimsizliği azaltacağı aynı zamanda yeraltı suyu ve toprağa geçecek metalleri tutabileceği gösterilmiştir (Goswami ve Mahanta, 2007).

Uçucu kül üniform bir özelliğe sahiptir ve dane boyutu (0,076-0,002 mm) arasında değişmektedir. Geçirgenliği düşüktür ve tabii zemine göre daha düşük özgül ağırlığa sahiptir, kireç ile karıştırıldığında elde edilen karışım su ile teması sonucu zamanla sertleşir ve su tutucu bir hal alır (Günel, 1996). Basınçla kireç-uçucu kül enjeksiyonu, zeminlerin hacim değiştirmelerini azaltmak ve taşıma güçlerini artırmak için yapılan bir uygulamadır. Uçucu küller silisyum oksit, demir oksit ve alüminyum oksit birleşimlerine sahip olması sebebiyle kendiliğinden sertleşerek çimentolaşmayı sağlamaktadır. Uçucu kül ve kireç karışımı yapıları desteklemek amacı ile yapılan

dolguların stabilizasyonunda, onarılmasında ve geçirimsizliğin sağlanmasında kullanılmaktadır (Büyükoflaz, 2023).

Endüstriyel atık olan metal cürufunun beton ve harçlar için dayanımı güçlendirme ve geçirimsizliği azaltma konusunda çalışmalar yapılmış, kil ve alüvyon zeminlerle işleyişi ile alakalı yeterli sayıda çalışma yapılmamıştır. Metal cürufunun, uçucu kül ve doğal puzolan gözenekli malzemeler ile etkileşime girerek gözenekleri dolduracağı bilinmektedir. Bu çalışmada da ince taneli olan öğütülmüş cürufun enjeksiyon harcı içerisindeki gözenekliliği azaltacağı ve doğal puzolan ilavesi ile enjeksiyon harcının geçirimsizliğe katkı sağlayacağı uçucu kül ile beraber ikame edilip çimento kullanımını azaltıp karbon emisyonunun düşürülmesi hedeflenmektedir.

Çalışma kapsamında bir başka hedeflenen konu ise, daha ekonomik enjeksiyon şerbeti malzemesi elde etmektir. Kullanılacak metal cürufu bir endüstriyel atık olduğu için düşük maliyete sahiptir. Bu özelliği sayesinde hazırlanacak olan enjeksiyon şerbetlerinde cüruf kullanımı ne kadar artarsa uygulanacak olan enjeksiyon işleminin maliyeti düşecektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Enjeksiyon yapılmasının genel amacı yeraltı sularının yapılara olan zararını önlemek ve zeminlerde meydana gelen boşlukları doldurmaktır. Bu amaç doğrultusunda enjeksiyon şerbetlerinde kullanılan malzemeler çeşitlik gösterebilir. En uygun malzeme olan çimentonun enjeksiyon şerbeti karışımında oranının düşürmek için uçucu kül, doğal puzolan, öğütülmüş metal cürufu kullanımı şerbet içindeki çimentonun hem sağlamış olduğu geçirimsizliği sağlamakta hem de istenilen dayanımı verebilmektedir. Hazırlanacak harçların özellikleri uygulama alanlarına göre farklılık gösterebilir. Örneğin tünel çalışmalarında harcın erken sertleşmesi istenir.

Tan ve ark., (2007) enjeksiyon maliyetini düşürmek için çimento yerine ikame edebilecek olan bentonit, UK, silis dumanı gibi katkı malzemeleri ile çimento esaslı enjeksiyon karışımları hazırlamışlar ve bu karışımların basınç dayanımı hakkında gözlemler yapmışlardır. Çimento yerine hazırlanan çimento esaslı harcın %3 bentonit, %10 UK, %20 silis dumanı kullanılmasıyla 7, 14, 28 günlük en yüksek tek eksenli basınç dayanımı verdiğini gözlemlemişlerdir.

Yaprak ve ark., (2004) UK ve yüksek fırın cürufunun süper akışkanlaştırıcı katkılı beton üzerindeki etkisini araştırmışlar. Ağırlıkça %0, %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine ikame ederek 15*15*15 küp numuneler halinde beton numuneler oluşturulmuş 7, 28 ve 90 gün kür edildikten sonra basınç ve yarmada çekme deneyine maruz bırakılmışlardır. Sonuç olarak en iyi dayanımları %10 UK ve %20 oranında yüksek fırın cürufu içeren betonların verdiğini tespit etmişlerdir.

Baba, (2023) baraj ve dolgu gövdelerinin iyileştirilmesi için puzolan etkisi için UK ve kalsiyum içeren yapısı gereği ile dane çapı 300 μ 'dan küçük mermer tozu karışımını kullanmış ve en küçük geçirimsizlik değerinin $3,62 \cdot 10^{-7}$ m/sn değer ile %15 mermer tozu+%30 UK karışımı ile elde etmiştir.

Erdoğan, (2011) çimento yerine kullanılan çimento miktarının sırasıyla %10, %20, %30'u oranında UK ve doğal puzolan ikame ederek hazırlanan beton numunelerini geçirimsizlik testine tutmuş ve UK, doğal puzolan katkılarının beton permeabilitesi üzerinde etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar UK ve doğal puzolan miktarının artmasının betonun su basıncı altında su işleme derinliğini azalttığını göstermiştir.

2.1. Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu kül zemin stabilizasyonu, tünel kaplama arkası dolgu enjeksiyonu, baraj gövdesi çatlaklarda çatlak enjeksiyonu olarak kullanılmaktadır. Düşük hidratasyon ısısı sayesinde, özellikle büyük hacimli enjeksiyonlarda çatlama riskini azaltır. Puzolanik reaksiyonu sonucunda daha yoğun bir mikro yapı oluşturmaktadır. Ayrıca, çok ince taneciklerden oluştuğu için harcın akışkanlığını artırıp, işlenebilirliği daha kolay hale getirmektedir.

Büyükoflaz, (2023) optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kil numunesi ile kil-UK karışımlarından oluşan numunelerde gözlemler yapmış UK oranının artmasıyla serbest şişme potansiyelinde azalma eğilimini gözlemlemiştir. Katkısız killerde serbest şişme %12,45 iken %15 oranında UK katıldığında numunedeki şişme %4,7 mertebesine kadar gerilediği görülmüştür. Killi zeminlerde %10 UK katılması uygulanan statik yükler altındaki hacim değişiminin %30 kadar azaldığını konsolidasyon deneyi ile belirlenmiştir.

Geoteknik uygulamalarda UK, dolgu yapmak için ve zemin stabilizasyonu için kullanılmaktadır. Geçirimsizliği sağlamak amacıyla yol kaplamalarının altındaki dolgu tabakalarında, depolama sahalarında, donatılı zemin duvarlarında, farklı beton kaplama ve döşemelerde meydana gelen hasarların onarımında enjeksiyon uygulamasında kullanılmaktadır. Yapılan deneylerde yol dolgularının yapımı aşamasında UK çimento ile beraber kullanılabileceği gösterilmiştir (Aruntaş, 2006).

Mishra ve diğ., (2005) kaolinit sınıfı zemine sırasıyla %0, %2, %4, %6 oranlarında bentonit kullanarak yüksek plastisiteli (CH) zemin numuneleri oluşturmuş olup bu zeminlere UK (%5, %10 ve %20) farklı oranlarda ekleyerek zeminleri stabilize etmişlerdir. UK katkısının artmasıyla serbest basınç dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Kür süresi ile basınç dayanımı grafiklerini incelediğinde kür süresi 7 günü geçtikten sonra önemli bir değişimin olmadığını saptamışlardır.

Şenol vd., (2006) OH, CH, CL ve ML sınıfı zeminlerde ayrı ayrı 2 farklı C sınıfı UK ve 2 farklı standartta tanımlanamayan sınıfta olan UK ekleyerek UK katkılarının zemin dayanım özelliklerine etkilerini incelemek için numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan numuneleri 7 günlük kürde beklettikten sonra dayanım parametrelerini belirlemek amacıyla hem serbest basınç hem de Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Düşük plastisiteli kil (CL) numunesine eklenen %12, %16, %20 oranındaki UK katkılarında basınç dayanımları sırasıyla %451, %491, %516

oranlarında artmıştır. Dayanımların önemli bir şekilde artmasının sebebi kullanılan UK içerisinde yüksek oranda (%23) CaO içermesinden dolayı stabilize olan kilde çimentolaşmanın daha yüksek olmasındadır. UK katkısı CBR değerinin yüksek oranda (%1033-1833 arası) artışına neden olduğu saptanmıştır. CH kil numunesi %10, %14 ve %18 oranlarında UK ile karıştırıldığında CBR değerinin sırasıyla %17,65, %17,65 ve %47.05 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu sonucun CH kili için kullanılan UK'nın CaO oranının CL kili için kullanılanından daha düşük olması sebebiyle gerçekleştiği belirlenmiştir.

Totiç E. ve ark., (2019) uçucu külün killi zeminler için mekanik özelliklerine katkısını araştırmış numuneler üzerinde serbest basınç ve CBR deneyleri uygulamıştır. CH kili içeren zeminlere katkı olarak %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında UK eklenerek hazırlanan numunelerde elde edilen sonuca göre %10 UK içeriği ile killi zemin stabilizasyonun en iyi sonuç verdiği ve zemin için istenilen taşıma gücünü sağladığı belirlenmiştir.

Dehghanian, (2021) killi zeminin iyileştirilmesinde UK etkisini araştırmış CL zemine %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında UK eklemiştir. Hazırladığı numuneler üzerinde serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. UK katkısının artışı ile kohezyon değerinin düştüğü ve %5 UK içeren numunede içsel sürtünme açısının arttığını belirlemiştir.

Gou ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada çimento ile uçucu külün karışımı ile meydana gelen harcın mukavemet özellikleri, hidrasyon ve mikroskopik mekanizma özelliklerini incelemişlerdir. UK'nın çimentoya dâhil edilmesi, çimento hamurunun akma gerilimini ve plastik viskozitesini azalttığı %30 UK dâhil edilmesiyle çimento hamurunda en düşük kayma gerilmesi derecesine ulaştığını tespit etmişlerdir. UK dâhil edilen harcın hidrasyon ekzotermik oranını ve toplam hidrasyon ekzotermik ısını azalttığını ve hidrasyonun indüksiyon periyodunu uzattığını tespit etmişlerdir. UK katkısının çimentoya oranı %20-30 arasında mukavemet ve akışkanlık özelliği açısından en iyi reolojik özellikler verdiğini tespit etmişlerdir.

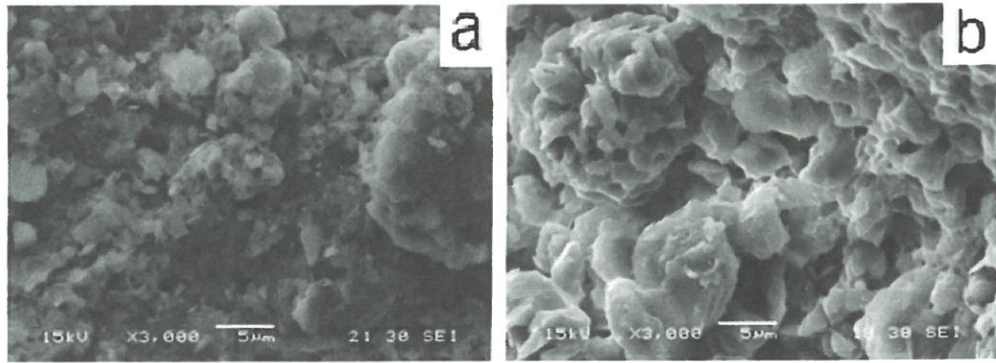
Dolgu malzemeleri üzerinde UK kullanımı hakkında araştırmalar yapılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Japonya da havaalanı ve liman inşaatlarında sıvılaşmaya karşı dayanıklı sonuç verdiğinden UK çimento hamurunda katkı olarak kullanılmıştır (Horiuchi, 2000).

Zha ve Liu, (2008) Çin'de genleşen topraklar üzerinde yaptıkları çalışmalarda uçucu kül ile genleşen topraklara hemen müdahale edilip UK ikamesi içeren çimento

enjeksiyonu uygulandığında serbest basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmadığı ama 7 gün kür edildikten sonra serbest basınç dayanımında önemli bir şekilde artış olduğunun tespit etmişlerdir.

UK zemin stabilizasyonu sağlamak için çimento içerisinde ikame edilerek suyla karıştırılıp sert bir kütle haline getirilebilir. Toprağa UK eklenmesi toprağın özgül yüzeyini ve sahip olduğu daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle optimum nem içeriğini artırır. Killi toprağa %15 oranında UK katkısı eklemek likit limit (LL) değerinin %47 ve plastisite indeksini (PI) %13'e kadar azaltmış olup CBR değerini %3'ten %56'ya çıkarmıştır (Ahmed, 2014).

Nguyen ve Phan, (2021) yol yapımında katmanlar için çimento ve UK ile stabilize edilmiş zeminin mühendislik özellikleri hakkında çalışma yapmışlar %8 ve %10 çimento içerikli zemin numunelerine %2, %4, %6 UK ekleyip 7, 14, 28 gün süre ile kürde bekletmişlerdir. UCS testi yapıp, SEM, XRD analizleri yapmışlardır. Zemine %8 çimento ve %2 UK eklenerek oluşan karışımların serbest basınç dayanımı ve elastik modülü açısından en iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır. SEM görüntülerinde Şekil 2.1. (a)'da gösterildiği gibi çimento ve UK içermeyen zeminlerde sıkıştırılmış zemin yapısının jel bağı olmayan küçük parçacıklar şeklinde olduğu, (b)'de ise, UK ve çimento katkılı zeminlerde zemin taneciklerini çevreleyen yapıştırıcı nedeniyle köpükleşme oluşumu gösterdiği ve zemin yapısındaki taneciklerin küçük parçacık halinde gözlenmediği saptanmıştır.



Şekil 2.1. Sıkıştırılmış zemin ve UK-çimento katkılı zemin SEM görüntüsü (Phan , 2021)

Mahvash ve ark., (2017) uçucu külün ince kum üzerindeki etkisini ve dolgu malzemesi olarak uygunluğunu değerlendirmek için deneyler yapmışlar optimum UK içerik miktarını belirlemeye çalışmışlardır. UK %5, %10, %15 oranlarında ayrı ayrı olarak alınmış çimento miktarı bütün numunelerde %3 oranında sabit tutulup, elde

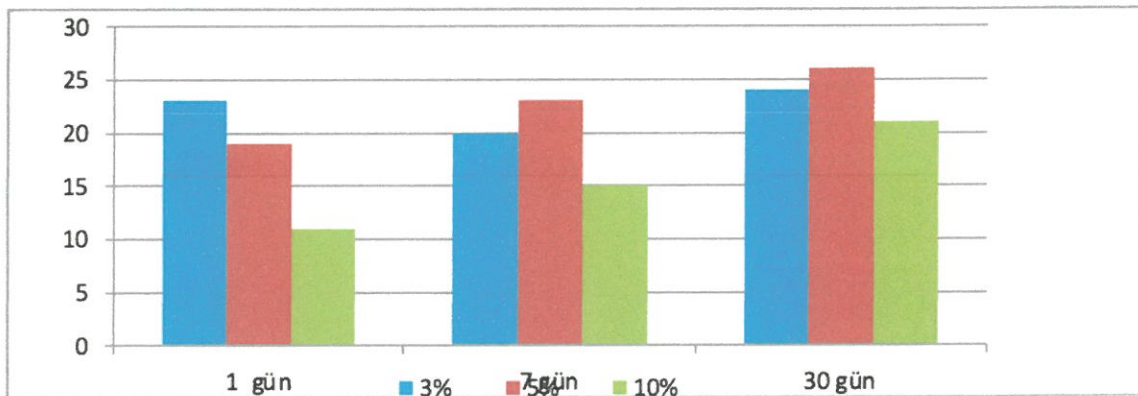
edilen karışımlar kıyaslandığında UK oranı arttıkça maksimum kuru yoğunlukta azalma ve daha yüksek optimum nem içeriğini gözlemlemişlerdir.

Amadi, (2010) laterittik toprağa %20 oranında UK ilave ederek LL, PI, optimum nem içeriği ve basınç dayanımlarındaki değişimini incelemiştir. Kuru birim hacim ağırlığının % 6 azaldığını optimum nem içeriğinin %5 arttığını LL değerinin %70, PI değerinin %16 oranında azaldığını tespit etmiştir.

Banaszkiewicz ve ark., (2022) benzenle kirlenmiş zeminin UK-çimento karışımı ile zemin iyileştirme işlemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Kendi içerisinde %70 Portland Çimentosu ve %30 UK karışımı ile elde edilen harcın zemin numunesine ağırlıkça sırasıyla %40, %60, %80 oranında ekleyerek su emilimi ve basınç dayanımdaki değişim sonuçlarını incelemiştir. Basınç dayanımları sırasıyla 3,57, 4,53, 6,79 MPa gelerek su emilimleri ise %15 ile %22 dm aralığında değişimi tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan UK türü F sınıfı uçucu küldür. Bu UK türü bitümlü kömürlerin yakılmasıyla meydana gelen içerisindeki S+A+F toplamı UK'nın %70 ini geçen küllerdir. CaO miktarı %10'un altında olduğundan düşük kireçli UK olarak isimlendirilir. TSE'ye göre çimento ve beton üretimlerinde kullanılacak olan uçucu külün SiO_2 , $Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı uçucu külün ağırlığının %70'inden fazla olması gerekmektedir ve UK amorf yapıya sahip olmalıdır (Büyükoğlu,2023).

Savran, (1988) kohezyonlu zeminlerin, UK katılarak stabilizasyonu incelenmiş CH türü kil üzerinde değişik miktar ve oranlarda UK kullanılarak kayma dayanımı ve serbest basınç dayanımı üzerinde deneyler yapılmıştır. Zeminin geçirimsizliğinin, serbest basınç dayanımının ve drenajlı kayma dayanımının arttığı bulunmuş zemin sıkışa birirliğinin azaldığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.2. Karışım içindeki uçucu kül oranı ve kür süresine göre basınç dayanımı (Mpa) (Aksoy, 2008)

Aksoy (2008) zemin karışımları numuneleri alarak numunelere belli oranlarda UK karıştırmış ve UK karışım oranları ile 1, 7 ve 30 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımlarını incelemiş ve Şekil 2.2’de gösterilen sonuçlara ulaşmıştır.

Dane boyutu dağılımı ve puzolanik aktivitesi uçucu küllerin enjeksiyon şerbetlerinde kullanımını sağlamaktadır. Zeminlerin geçirimsizliğini azaltmak ve dayanımını artırmak için kullanılmaktadır. Uçucu kül stabilizasyonu, kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biridir. Zemin ve uçucu kül karıştırıldığında birçok reaksiyon meydana gelir. Uçucu kilin içindeki kireç, silika ve alüminat ile reaksiyona girer ve çimentolaşma bileşenleri kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat jelleri oluşur. Bu bileşenlerin katı halde olan mineralleri bir birine bağlaması ile zemin dayanımı artar (Dermatas ve Meng, 2003).

Uçucu küllerin dane şekli yuvarlak camsı küresel ve çapları 1-200 μ arası değişmektedir. Taneciklerin %75 inden fazlası 45 μ altında olup yoğunluğu 2,2-2,7 g/cm³ arasında değişmektedir. Özgül yüzeyi çimento inceliğine yakın olduğundan herhangi bir öğütme işlemine maruz bırakılmadan çimento ile kullanılabilir (Aruntaş 2006).

Demiröz, (2009) uçucu küller kimyasal özellikleri sayesinde zararlı olan atık sulardan daha az etkilenmektedir. Fiziksel boyutları küçük olduğundan karışım içinde boşlukları doldurması sebebiyle geçirimsizliğe katkı sağlar ayrıca düşük plastisitesi sayesinde donmaya karşı daha hassaslık gösterirler. Bu durumundan ötürü yol veya zeminlerde kaplama olarak kullanılacak olan uçucu küllerin bozulabileceği dikkate alınmalıdır.

2.2. Doğal Puzolan Kullanımı

Ghasemi ve ark., (2022) doğal puzolan ile karıştırılmış çimento hamurunun hidrasyon kinetiği, hidrasyon derecesi, mikro yapısal morfolojisi ve gözenek yapısı ile mekanik taşıma özelliklerini incelemişlerdir. Doğal puzolanın ince tane boyutu ve yüksek özgül yüzey alanlı fiziksel özellikleri sayesinde C₃S hidrasyon ürünlerinin oluşmasını hızlandırmış, kimyasal birleşimi C₃A hidrasyonunu hızlandırmış indüksiyon periyodunun azalmasına yol açmıştır. Doğal puzolan olmayan numuneye göre doğal puzolan içeren numunede gözenek çapları %10,7 ile %27,7 arasında azalmıştır. Basınç dayanımını puzolan kullanılmayan numunelere göre %6,7 ile % 24,6

arasında arttığını tespit etmişlerdir. Pozolan kullanımının %21,7 oranında daha az enerji tükettiği %20,3 oranında daha az karbon salınımına sebep olduğunu gözlemlemişleridir.

Koçak Y., (2010) yaptığı çalışmada doğal pozolanın, çimento içerisine eklendiğinde basınç dayanımına, priz süresine, su ihtiyacına ve hacim genleşmesine etkilerini araştırmıştır. Doğal pozolan ağırlıkça %0, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında çimento yerine ikame edilmiş elde edilen sonuçlara göre katkısız çimentoya nazaran su ihtiyacı ve priz başlama süresinde artış görülmüştür. Ayrıca; 2,7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında bir azalma meydana gelmiş ancak, %10 ve %15 oranındaki doğal pozolan katkılı çimento harçlarının basınç dayanımlarının ortalama değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

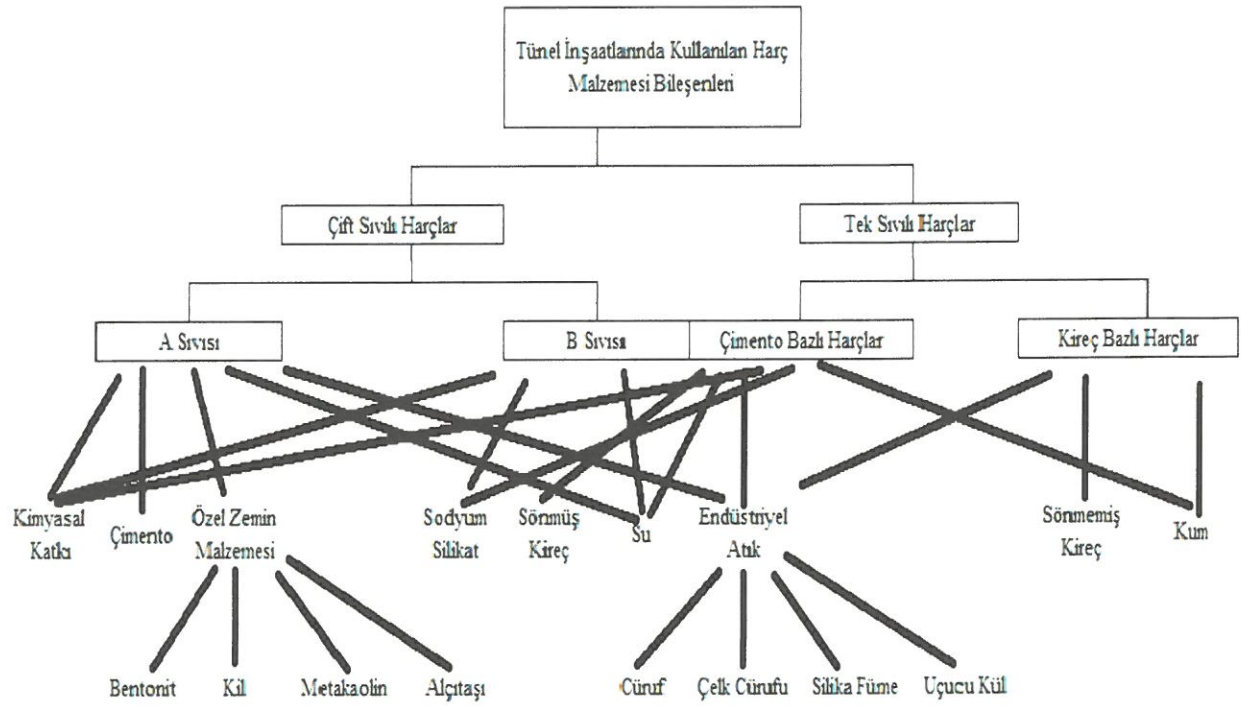
Çavdar ve Yetgin, (2010) pozolan içerisindeki yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 bulundurup ince öğütülmesi sayesinde, çimento içindeki boşlukları doldurduğu bu sayede geçirimsizliği arttırdığı asitli ve sülfatlı ortamlarda çimento kullanılan betonu daha dirençli hale getirdiğini tespit etmişlerdir. Pozolan çimento içerisinde ilk olarak serbest CaO ögesiyle tepkimeye girerek hidratasyon hızını ve ısını düşürüp daha düzgün kristalleşmeyi sağlamakta bu da dayanıma olumlu etki etmektedir. Doğal pozolan sayesinde pozolanik çimentonun dane inceliği daha az enerji harcanarak artırılabilceği, böylece çimento içi boşluklar dolara basınç dayanımı ve geçirimsizliğin artacağını tespit edilmişlerdir.

Çelik, (2005) doğal pozolanın, uçucu külün ve yüksek fırın cürufunun ayrı ayrı çimento yerine ikame edilmesi ile çimento harcında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Öğütülmüş doğal pozolan ikamesi ile yapılan harçların dayanımlarında düşüşün olduğunu, donma/çözülme döngüsünün oluşturduğu olumsuz etkilerden tras katkılı çimentoların UK ve yüksek fırın cürufu katkılı çimentolara göre daha çok etkilendiğini tespit etmiştir.

2.3. Metal Cürufu Kullanımı

Bazı çalışmalar endüstriyel atıkların tünel mühendisliğinde harç malzemesi olarak kullanılma potansiyeline ve uygulanabilirliğine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 2.3'te uçucu küllerin, metal cürufunun, silika dumanının endüstriyel atık malzeme olarak elde edildiği ve tek sıvı yöntemi jet grout uygulamalarında hem çimento bazlı hem de kireç bazlı enjeksiyon işlemlerinde malzeme olarak kullanıldığı gösterilmiştir. Endüstriyel atık, harçların mekanik özellikleri, akışkanlığı, atığın türü ve

dozajına bağlıdır. Dayanım ve izlenebilirlik arasında denge kurmak için atık aralığı %20-50 arasında değerde katılarak yapılması düşünülmektedir (Bolin, Jiang Wu (2023)).



Şekil 2.3. Harç Malzemesi Bileşenleri (Bolin, Jiang Wu (2023))

Shi ve ark., (2022) çelik cürufu ile karıştırılan çimento harcının işlenebilirliği, kümülatif su emilimi, korozyon direnci ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Harçtaki çelik cürufu miktarı arttıkça yüzey serbest enerjisinin azaldığı ve su emiliminin azaldığının korozyon direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Harç miktarının ağırlıkça %10 miktardan az cüruf katılması basınç ve eğilme dayanımlarını iyileştirdiği ve çevresel etki olarak olumlu sonuçlar çıkardığını tespit etmişlerdir. Çelik cürufu yapısındaki $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ moleküller ve jel oluşturma özellikleri gösteren bazı camı yapılar sayesinde çimento esaslı harçlarda kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Çelik ve metal cürufu asfalt kaplamalarda agrega olarak kullanılmaktadır. Asfalt karışımlarında nem kaynaklı hasara ve kalıcı deformasyona karşı dirençli olduğu bilinmektedir. Cürufun köşeli ve pürüzlü parçacıkların varlığı, birbirine geçen mekanizmayı güçlendirerek sağlam mekanik özellik kazandırmaktadır. Araştırmalara göre ağırlıkça %30 ile %85 oranında çelik cürufu kum karışımı CBR sonuçlarını %455'e kadar çıkarmaktadır (Yusoff ve ark, 2024).

Metal cürufundaki artış, hidrasyon ürünlerindeki azalmaya bağlı olarak daha pürüzsüz bir yüzey sağlamaktadır. Bu da hidrofobik bir yapı oluşmasına sebep olmaktadır. SEM analizinden elde edilen verilere göre metal cürufu katkısı ile oluşan bu hidrofobi çimento parçacıklarının yüzeyinde çapraz bağ yapması ve gözenekleri doldurmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bu tür çimento esaslı metal cüruf katkılı harçlar yüksek geçirimsizliğe sahip olmaktadır (Yin, Zeng, ve ark., 2024).

Metal cürufunun plastik olmayan özellikte olması ve donma çözülmeden az etkilenmesi nedeniyle yağış, yeraltı suyu veya deniz suyu ile temasından olumsuz bir durum olmayacağı değerlendirilmiştir. Metal cürufunun yoğunluğu, su emme özelliği ve LA aşınma kaybı genellikle doğal agregadan fazla olduğu belirlenmiştir (Tozsın ve ark., 2023).

Shashank ve Revathi, (2017) çalışmalarında metal cürufunun zemin içerisinde %5 ile %25 arasında oranlarla doğal stabilizasyon malzemesi olarak kullanabileceği üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Toz çelik cürufunun bozuk zeminlerde kullanıldığında basınç dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir.

Jalil ve ark., (2019) betonda kullanılan çimento yerine ikame endüstriyel çelik cürufu kullanımını incelemişlerdir. Yapılan incelemelerde çelik cürufun çimento ile aynı akışkanlığa ve işlenebilirliğe sahip olması için çimentodan daha fazla suya ihtiyaç olduğunu belirlemişlerdir. İncelemek için hazırlanan numunelere yapılan basınç testlerinde 100 nolu elekten geçen endüstriyel cüruf ile %10 ve %20 oranlarında ikame edilen çimento harçlarını cürufsuz çimento harçları ile kıyaslandığında cüruf ikame edilen harçlarda basınç dayanımlarının sırasıyla %86 ve %74'e kadar düştüğünü tespit etmişlerdir.

Metal cürufunun C_2S , C_3S ve C_4AF dahil olmak üzere çimento hidratasyonu kolaylaştırma potansiyeli vardır. İçerisindeki SiO_2 sayesinde kompozit malzemelerde mukavemeti artırmak için dolgu maddesi olarak kullanılabilir. İkame oranı %60 olduğunda, metal cürufu çimentonun donma direncini, geçirimsizliğini ve sülfata karşı direncini artırır (Cai, Xin, Cao 2024).

Rui ve ark., (2022) CO_2 ile sabitlenmiş metal cürufunun çimento esaslı malzemelerin erken hidratasyon sürecini kolaylaştırdığını göstermiştir. Çimento sertleşme sürecinin hızlandığı ve priz süresinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Cai ve ark., (2024) metal cürufunun çimento esaslı malzemelerin çalışma performansları üzerindeki etkisini araştırmışlar. Metal cürufunun çimento esaslı malzemelerde akışkanlığı arttırdığını priz süresinin cürufsuz çimentoya göre yaklaşık

%210 ile %300 daha uzun olduğunu bulmuşlar. Çimento içinde cüruf optimum oranda ikame edildiğinde geçirgenliğin %30 azaldığı donma direncinin %15-20 arası iyileştiği saptanmıştır.

Yazıcı, (2006) metal cürufunun çimento yerine %30-40 oranında ikame edilmesi erken dayanımlarda düşüşe sebebiyet vermekte olup 28 günlük dayanımda ise, meydana gelen farkın kapandığını gözlemlemiştir. Farkın kapanmasının sebebini puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi olduğu saptanmıştır.

Qiang W. ve ark. (2013) metal cürufunun çimento ile etkileşimi sonucu beton basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, klorür geçirgenliği ve karbonatlaşma direnci üzerindeki etkisini iki farklı koşul altında incelemişlerdir. Cüruf ikamesinin artması basınç dayanımını azalttığı geçirgenliği arttırdığı ve betonun karbonatlaşma direnci yeteneğini düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Sun Y., (2005) cüruf malzemelerinin beton içindeki katkı oranlarını %0'dan %60'a kadar arttırarak gözlemler yapmış ve meydana gelen basınç dayanımının %28'e kadar düştüğünü gözlemlemiştir.

Kavasoğlu B., (2022) çelik cürufların sahip olduğu yüksek aşınma direncinden dolayı asfalt esaslı karayollarında kullanılabileceği, beton içinde kullanıldığında betonda donma-çözünme direnci ve gözenek yapısındaki boşlukları doldurduğunu gözlemlemiştir. Çelik cürufların kullanımı sürdürülebilir kalkınma amacı ile meydana gelen atığın bir başka alanda kullanılmasıyla ülke ekonomisine de katkı sağlamış olacaktır.

2.4. Bentonit Kullanımı

İncesu, (2012) yaptığı çalışmada endüstriyel atık maddelerin depolama tesislerin tabanında kullanmayı planlamış kum-bentonit karışımları oluşturup kireç ve yüksek fırın cürufu ile karışımları zenginleştirmiştir. Karışımlarda uygun bentonit oranını belirlemek için %40, %50 ve %60 oranlarında bentonit içeren bentonit-kum karışımları meydana getirmiş optimum karışımın %50 kum, %50 bentonit olduğunu tespit etmiştir. Karışım içerisinde bentonit ikamesinin artışının geçirimsizliği arttırdığını belirlemiştir. Artan bentonit miktarı ile ters orantılı olarak basınç dayanımının azalması beklenirken basınç dayanımının en yüksek değere %60 bentonit ve %40 kum içeren karışımda ulaştığı bulunmuştur.

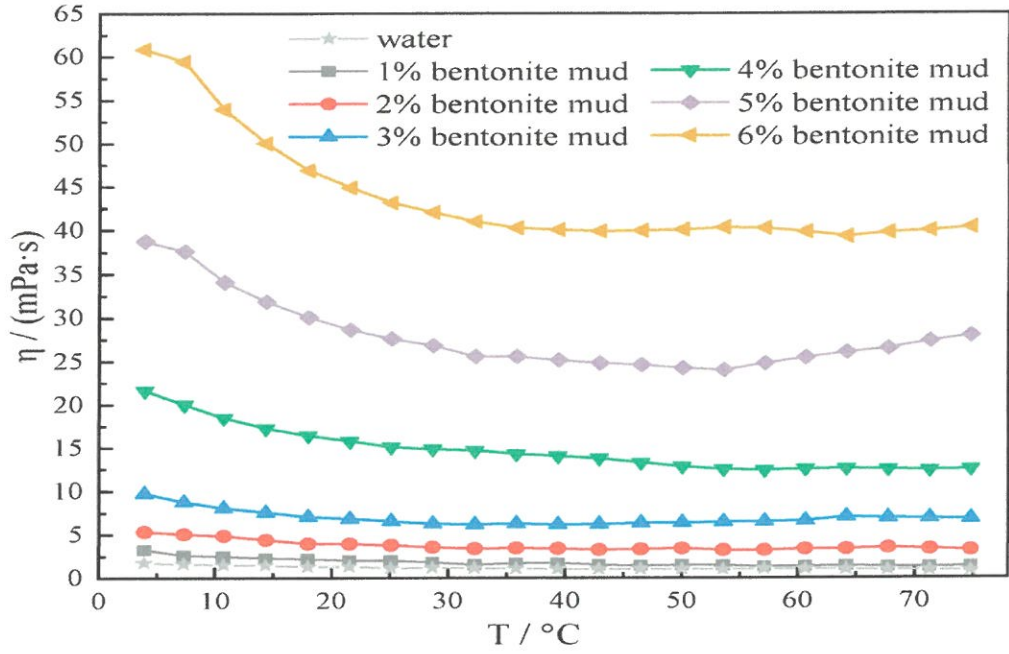
Özyılmaz, (2022) kum ve bentoniti optimum su içeriğinde belli oranlarda karıştırarak numuneler hazırlamış bu numuneleri kompaksiyon, düşen koni, casagrande, plastik limit ve serbest basınç deneylerine maruz bırakarak bentonit miktarının zemin içerisindeki artış ile değişimlerini incelemiştir. Karışımlarda bentonit numunesi arttığında kuru birim hacminin azaldığı likit limit ve plastik limit değerlerinin plastisite indeksi ile beraber arttığını tespit etmiştir. Düşen koni deneyindeki batma miktarı artarken drenajsız kayma dayanımında ise, azalma görülmüştür.

Cho ve ark., (1999) sıkıştırılmış olan bentonitin geçirimsizlik özelliklerine sıcaklık etkisini araştırmışlardır. $1,4 \text{ g/cm}^3$ kuru birim hacim ağırlığına sahip kalsiyum bentonite ait geçirimsizlik değerinin 10^{-11} m/s den küçük olduğunu tespit etmişler, ayrıca logaritmik geçirimsizlik değerleri ile kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

Türköz, (2009) sıkıştırılmış killerin şişme-büzülme etkisinde çevrimle mikro yapısal değişimi incelemiştir. Yüksek plastisiteli siltli kil (MH) üzerine kuru ağırlığın yüzdesine göre sırasıyla %0, %5, %10, %15 oranlarında bentonit katkısı eklemiştir. Elde ettiği numunelere kompaksiyon deneyi, SEM analizi yapmıştır. Kilin düşey şişmesinin, numunenin başlangıç haline ve bünyesindeki kil mineralinin tipine göre değiştiği sonucuna varmıştır.

Ahmad, (2021) kendiliğinden yerleşen beton türüne bentonit ve buğday samanı karışımı ile çimento ağırlığının %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırılarak, çökme basınç ve akışkanlık testleri yapılmıştır. 7, 14, 28 günlük kürleme işleminden sonra basınç testine tutulmuş bentonit oranı %15 oranına kadar 33 MPa dayanıma kadar artmış daha sonra %20 oranda kullanıldığında %28 MPa dayanıma düşmüştür. Bentonit oranı artmasıyla doğru orantılı olarak çimento harcın akışkanlık kabiliyeti düşmüştür.

Wang ve ark., (2024) çimento harcının içine farklı oranlarda (%1-%6 arası) bentonit katkısı ilave etmişler ve 0°C 'den 70°C 'ye kadar farklı sıcaklıklarda viskozitedeki değişimi incelemişlerdir. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi düşük sıcaklıkta jelleşmenin arttığı yüksek sıcaklıklarda viskozitenin arttığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.4. Çimento hamurunun farklı bentonit katkısı ile farklı sıcaklıklarda viskozite değişimi (Wang ve ark., 2024)

Çuhalı ve Türkel, (2024) kalsine edilmiş sodyum bentonit katkısının çimento esaslı harçlarda geçirimsizliğe olan etkisini incelemişlerdir. Sodyum-bentonit ile kalsine edilmiş sodyum-bentonitin puzolanik aktivite deneyi yaparak kıyaslamışlar ve bentonitin puzolanik özellik kazandığını gözlemlemişlerdir. Bentonitin çimento yerine optimum ikamesi için farklı oranlarda (%5,%10,%15,%20) bentonit içeren çimento esaslı karışımlar hazırlamışlardır. Deney sonucunda %20 oranında bentonit ikamesi ile hazırlanan harçların geçirimsizliğe belirgin bir katkı sağladığını gözlemlemişlerdir.

Laidani ve ark., (2020) beton üretimi için aktifleştirilmiş bentonitin %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında çimento yerine ikame ederek sonuçları incelemişlerdir. Bentonitin %10 ve %15 oranlarında çimento yerine kullanıldığında basınç mukavemetini arttırdığı, gözenekli yapısını ve geçirimsizliği azalttığını gözlemlemişlerdir. Bentonit kullanımının işlenebilirliği ve akışkanlığı iyileştirildiğini tespit etmişlerdir.

Chandrakanth ve Rao, (2016) betonda ham bentonitin kısmi ikamesini araştırmışlar çimento ağırlığının %0, %5, %10, %20 oranında bentonit ikamesi kullandıklarında %5 oranında ham bentonit ikamesi basınç, çekme ve eğilme dayanımında iyileşmelere sebebiyet verdiğini tespit etmişlerdir.

Fode ve ark., (2024) çimento yerine bentonit ikame edilmesinin en iyi basınç ve çekme dayanım sonuçlarının 7 ve 28 günlük numune sonuçlarında verdiğini

belirlemişlerdir. Ayrıca aktifleştirilmiş bentonitin, ham bentonit karışımı betona kıyasla daha yoğun bir yapı oluşturarak betonun mikro yapısını iyileştireceğini bulmuşlar.

Solma P., (2008) çalışmasında endüstriyel atık olan döküm kumuna bentonit katkısı eklemiş ve geçirimsizlik özelliğini incelemiştir. Döküm kumu içerisindeki bentonit oranı %10'u geçtiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlığı düşmekte ve optimum su muhtevasının arttığını gözlemlemiştir. Bentonit içeriğinin %5'i geçtikten sonra geçirimsizliğin hızla arttığını %15 seviyesine ulaştığında geçirimsizliğin 10^{-7} m/sn olduğunu gözlemlemiştir.

Akcanca, (2009) Atık depolama alanında geçirimsizliği sağlamak için kumbentonit ve kireç karışımını oluşturmuş karışımındaki bentonit miktarının artması ile geçirimsizlik artmış ancak, bentonitin yapacağı şişmeyi engellemek için ilave edilen %1-3 arası kireç ilavesi ile geçirimsizliğin azaldığını tespit etmiştir.

Salomao, (2024) çimento harçlarında bentonit ilavesinin geçirimsizliğe olan etkisini araştırmış çimento harcına ağırlıkça %2 oranında bentonit ekleyerek 25 C⁰ sıcaklıkta 28 gün kürde bekleterek incelemede bulunmuştur. Küre maruz bırakılan numunelerin su emme değerlerinde veya ezilme mukavemetinde önemli bir değişikliğin olmadığı tespit edilmiştir. Hazırlanan harçların beton numuneleri yüzeyine uygulandığında pozitif ve negatif basınç altında su penetrasyonuna karşı durumlarına bakılmıştır. Pozitif basınç altında su penetrasyonunda %18,6'lık bir azalma olduğu negatif basınç altında yapılan testlerde numunelerin üst yüzeyine sıvı sızmasının önleniği tespit edilmiştir.

Mengliang ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada sodyum, kalsiyum ve magnezyum bentonit olarak 3 farklı bentonit türünün çimento harcına ilavesiyle meydana gelen gelişmeleri incelemişlerdir. Su geçirimsizliğinde magnezyum bentonitin, izlenebilirlik açısından bakıldığında sodyum bentonitin en iyi sonuç verdiği, 3 farklı bentonitin de basınç mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

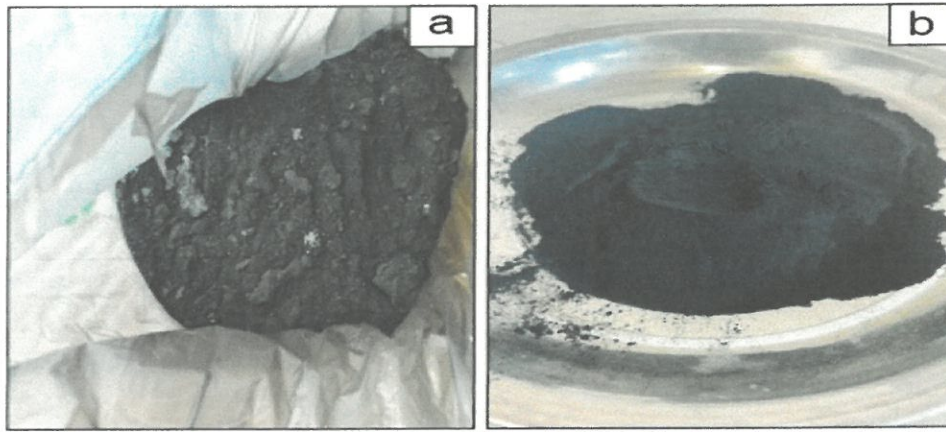
3.1. Malzemeler

Tez çalışması kapsamında, su yapılarında dayanımı ve geçirimsizliği sağlamak için lazer kesimi sonucu açığa çıkan metal cürufu, termik santrallerde atık malzeme olarak ortaya çıkan uçucu kül, doğal puzolan ve çimento kullanılacaktır. Bu malzemelerin belli oranlar ile karıştırılması ile elde edilen bağlayıcı malzemeye bentonit ve akışkanlaştırıcı katkıları ilave edilerek su ile karıştırılıp enjeksiyon şerbeti elde edilmiştir.

3.1.1. Metal Cürufu

Lazer kesim artığı olan metal cüruf, metal kesme işlemi sırasında açığa çıkan bir yan üründür. Lazer kesim, yüksek yoğunluklu lazer ışını kullanılarak metal levhaların kesilmesini sağlar. Bu işlem sırasında metal yüzeyinden eriyen veya buharlaşan metal parçacıkları oluşur ve bunlar cüruf olarak adlandırılır. Lazer kesim cürufu genellikle sert ve kırılgandır. Bu durum cürufun yeniden kullanımını zorlaştırabilir. Cüruf parçacıkları, mikroskobik boyuttan milimetre boyuna kadar değişebilir. Cürufun yoğunluğu, kesilen metalin türüne ve yapısına göre değişkenlik gösterebilir. Metal cüruf, yüksek oranda metal oksitler içerir. Bu, cürufun kimyasal olarak insert olmasına veya bazı durumlarda reaktif olmasına neden olabilir. Kesim sırasında kullanılan gazlar ve işleme parametrelerine bağlı olarak cüruf, kirleticiler veya yabancı maddeler içerebilir. Amorf bir yapıya sahip olan metal cürufu bu amorf yapısı sayesinde su geçirgenliği azaltıcı özellikler gösterir. Metal cürufu ve uçucu kül karışımının beton ve diğer yapı malzemelerinde kullanılması, geçirimsizlik özelliklerini belirgin şekilde artırır. Boşluk doldurma, kimyasal reaksiyonlar ve betonun mikro yapısının yoğunlaşması gibi mekanizmalar sayesinde, bu karışım, suyun ve diğer zararlı maddelerin yapı içerisine nüfuz etmesini önler. Bu nedenle, metal cürufu ve uçucu kül karışımı, dayanıklı, uzun ömürlü ve geçirimsiz yapıların inşasında tercih edilen malzemelerdendir. Metal cüruflar beton üretiminden zemin stabilizasyonuna kadar çeşitli projelerde kullanılabilir. Bu inşaat yapım maliyetini azaltırken cürufun çevresel açıdan da sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Metal cürufun çimento içerisinde ikame edilmesi çimento harcının ömrünü artırır.

Şekil 3.1. (a)'da gösterilen kesimde elde edilen cüruflar sıcak haddeleme yapılarak üretilen yassı çeliğin lazer kesimi sırasında toz haline gelen kısmıdır gösterilen cürufun ham halini dane boyutu 0-20 mm arasında değişmektedir. Çimento uçucu kül ve puzolan ile karışımlarında kullanılması için istenilen dane boyutun 90µ ile 150 µ arasında olması gerekmektedir. İstenilen dane boyutunu elde etmek için metal cürufu öğütülüp 100 nolu elekten geçirilmiş ve Şekil 3.1. (b) gösterildiği hali alarak karışımlarda kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Metal Cürufu ham hali (a) ve Öğütülmüş Metal Cürufu (b)

Metal cürufu çimento ile girdiği karışımda çimento içindeki kireçle (Ca(OH)_2) puzolanik reaksiyonlara girerek bağlayıcı özellik taşır. Metal cürufunun girdiği karışımda çimento oranını düşürmesi cüruf maliyetinin çimentonun yüzde on maliyetinde olması sebebiyle ekonomik kazanım sağlamaktadır.

Metal sac levhalar içerisinde karbon, mangan, silisyum, fosfor ve kükürt içermektedir. İçerisindeki kimyasal birleşim oranları Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. St37 Sac Metal Levha Kimyasal Bileşenleri (Türkiye Çelikçiler birliği)

Bileşen	Ortalama Ağırlıkça (%)
FeO	40–60
Fe ₂ O ₃	10–20
Fe ₃ O ₄	10–20
SiO ₂	2–5
MgO	1–4
Al ₂ O ₃	0.5–2
CaO	0.5–2
PO ₄ ³	<1
S	<1

3.1.2. Çimento

Doğal kalker taşı ve kilin belli oranlarda döner fırında pişirildikten sonra ortaya çıkan klinkerin alçı taşı ile karıştırılıp elde edilen toz halindeki hidrolik bağlayıcıya çimento denmektedir. Devlet Su İşleri enjeksiyon şartnamesinde enjeksiyon işlerinde kullanılacak çimentonun sülfat olmayan yerlerde CEM-I veya CEM-II olması yönündedir. Ayrıca şartnameye göre kullanılacak çimentonun özgül yüzeyi en az 3500 cm²/gr olmalı ve 200 mikron göz açıklığı olan elek üzerinde en çok %1,9 mikron göz açıklığı olan elek üzerinde ise en çok %12 kalıntı bırakmalıdır. Karışımlarda kullanılan çimento türü CEM II 42.5 R tipi kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de kullanılan çimento türünün XRD test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.2.Kullanılan CEM –II 42.5 R Çimentonun Kimyasal İçeriği

Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂	21
Al ₂ O ₃	6
Fe ₂ O ₃	3
CaO	64
MgO	3
SO ₃	2,5
K ₂ O + Na ₂ O	0,5
(Cl ⁻)	0,10

3.1.3. Uçucu kül

Uçucu kül, kömür veya diğer fosil yakıtların termik santrallerde yakılması sonucu meydana gelen ince partiküllerden oluşan bir yan üründür. Genellikle silis, alümina ve demir oksit gibi maddeler içerir ve beton, çimento, yol yapımı ve zemin stabilizasyonu gibi çeşitli inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. İçerisinde yüksek oranda silis içerdiğinden puzolanik bir malzemedir. Puzolanik malzemeler, su ile reaksiyona girdiklerinde kireçle birleşerek bağlayıcı bileşikler oluşturur. Partikül boyutu genellikle 1-100 mikron çapındadır ve yoğunlukları 2-2,6 g/cm³ arasında değişir ve kendi arasında F tipi ve C tipi olarak sınıflara ayrılır. F tipi UK, içeriğindeki CaO miktarı %10’dan az olan düşük kireçli UK türüdür. C tipi UK, içeriğindeki CaO miktarı %10’dan fazla olan yüksek kireçli UK türüdür. Çizelge 3.3’te F ve C sınıf UK içerik oranları gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. F ve C sınıf Uçucu Kül İçerik Oranları (Tokyay 1993)

ÖZELLİKLER	ASTM C618"F"(%)	ASTM C618"C"(%)	TS639%
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az %70	En az %50	En az %70
MgO	En Çok %5	En Çok %5	En Çok %5
SO_3	En Çok %5	En Çok %5	En Çok %5
$\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$	En Çok %1.5	En Çok %1.5	-
Kızdırma Kaybı	En Çok %12	En Çok %6	En Çok %10

Uçucu küllerin Avrupa çimento standartı ENV 197-1 sınıflandırıldığında silisli uçucu küller (V) ve kalkerli uçucu küller (W) olarak sınıflandırılır. V sınıfı küller puzolanik özellik göstermekte olup silisyumlu UK olarak da isimlendirilmiş ve reaktif CaO miktarı %5'in altında, SiO_2 miktarı ise %25'in üstünde olan uçucu küllerdir. W sınıfı uçucu küller ise hem puzolanik hem de çimentolaşma özelliğine sahip reaktif CaO miktarı %5'in üstünde olan kireçli uçucu küllerdir (Tokyay ve Erdoğan, 1998). Şekil 3.2'de uçucu külün karışıma girmeden önceki hali gösterilmiştir.

**Şekil 3.2.** Uçucu Kül

UK kullanımı beton ve çimentolarda basınç dayanımının düşürebilir bu nedenle hızlı dayanım gerektiren projelerde dikkatli kullanılmalı karışım oranlarındaki oranı belirlenirken çevresel koşullar göre optimize edilmelidir. Karışımlarda kullanılan uçucu külün XRF test sonuçları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan uçucu külün kimyasal içeriği

Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂	60,78
Al ₂ O ₃	21,68
Fe ₂ O ₃	5,48
CaO	3,48
MgO	1,71
K ₂ O	1,95
Na ₂ O	0,74

3.1.4. Doğal puzolan

Karışımlarda kullanılan doğal puzolan Konya Çimento'dan tedarik edilmiş olup, puzolana ait XRF analiz sonucu Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan doğal puzolanın kimyasal içeriği

Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂	65,21
Al ₂ O ₃	18,32
Fe ₂ O ₃	6,12
CaO	4,29
MgO	1,05
K ₂ O	2,64
Na ₂ O	2,39
Cl	0,007

Çalışmada kullanılan doğal puzolan ilk olarak öğütülmüş daha sonra 100 nolu elekten geçirilerek dane boyutları 150 µ altına indirilmiştir (Şekil 3.3).

**Şekil 3.3.** Doğal Puzolan

3.1.5. Bentonit

Bentonit, esas olarak montmorillonit bileşiminden oluşan doğal bir puzolan olup, çimentoda ikamesi, montmorillonitin serbest portlandit ile reaksiyonunda ekstra C-S-H jeli vermesi için önemlidir. Bu nedenle, C-S-H jeli çimento esaslı karışımlarda çimentonun gelişiminin tek nedenidir (Fode ve ark., 2024).

Bentonit, Al_2O_3 silisli mineraller açısından zengin bir kildir. Montmorillonit ve %87 toprak mineralinden meydana gelir. İnşaat mühendisliğinde şişme ve jel oluşumu sayesinde su ve sıvı sızdırmazlığı kazandırmak için tercih edilen aynı zamanda hazırlanan karışımlara akışkanlık kazandıran bir üründür. Alüminyum ve magnezyum bakımından zengin volkanik kül, tuf ve levhaların kimyasal ayrışması ve bozulmasıyla oluşan çok küçük kristallere sahiptir. Sıkıştırıldığında çok düşük geçirgenliğe sahip olduğu için dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir. Sodyum bentonit ve kalsiyum bentonit olarak sınıflandırılan bentonit çeşitleri arasında sodyum bentonit yüksek su tutma ve şişme kapasitesine sahiptir. Bu çalışmada enjeksiyon şerbeti karışımına hem su itici özellik katmak hem de enjeksiyon şerbetinin akışkanlığını sağlamak için bentonit kullanılmıştır.

Bentonit, suyu tutma özelliği sayesinde enjeksiyon şerbetinin kurummasını geciktirir ve uzun süre akışkan kalmasını sağlar ayrıca enjeksiyon şerbetindeki katı partiküllerin çökmesini önleyerek karışımın homojen olmasını sağlar.

Bentonit enjeksiyon şerbetinde kullanılırken karışım esnasında topaklanma olmamasına dikkat edilmeli topaklanmayı engellemek için karıştırma süresi arttırılabilir.

Hazırlanan karışımlarda sodyum bentonit kullanılmış ve karışma girmeden önceki hali Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Bentonit

3.2. Yöntem

3.2.1. Malzemelerin ve şerbet karışımlarının hazırlanması

Çalışma kapsamında ilk olarak karışım için kullanılacak malzemeler olan çimento, UK, metal cürufu, doğal puzolanın 150 mikron altında dane boyutlarına getirilmiştir. Metal cürufunun istenilen boyut haline gelmesi için ham halde alınan cüruf öğütülmüş ardında 100 nolu elekten geçirilerek karışımlar için uygun boyuta getirilmiştir. Uygun boyuta getirilen malzemelerin özgül ağırlığı bulunmuş olup ASTM C311-17'ye göre puzolanik aktivite testleri yapılmıştır.

Malzemelerin özellikleri belirlendikten sonra karışımlara olan etkisini incelemek için ön deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak referans karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan referans karışım DSI'nin şantiyelerinde enjeksiyon işleri için kullandığı harç karışımı olup 1 m³ için bağlayıcı/su oranı=1 olarak 675 kg çimento 75 kg bentonit ve 750 kg su malzemeleri kullanılarak karışım elde edilmiştir. Referans karışımına çökelme deneyi, marsh hunisi ile göreceli viskozite deneyi, serbest basınç deneyi, geçirimsizlik deneyi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, priz başlangıç süre tayini ve priz bitiş süresi tayini deneyleri yapıp, referans değerleri belirlenmiştir.

Referans değerleri belirlendikten sonra çimento yerine ikame edecek malzemelerin etkilerini belirlemek için 2 farklı ön aşama karışımları hazırlanmıştır. 1. Ön aşama çalışmalarında karışım için kullanılacak olan metal cürufu, doğal puzolanın ve UK malzemelerinin çimento ile karıştırılarak yeni bağlayıcı karışımlar elde edilmiş su/bağlayıcı oranı 1 olarak seçilmiştir. Ayrıca, karışımların hepsine %10 oranında bentonit ilave edilerek malzemelerin yapılacak olan enjeksiyon şerbeti karışımına etkisi için farklı oranlarda ayrı ayrı numune harçları hazırlanmıştır.

Metal cürufu, doğal puzolan ve uçucu külün çimento yerine ikame edilerek hazırlanan karışımların, karışım içerisindeki ağırlıkça oranları Çizelge 3.6'da gösterildiği üzere ilk olarak ağırlıkça %70, %75, %80, %85, %90, %95 oranlarında çimento ve farklı oranlarda %30, %25, %20, %15, %10, %5 metal cürufu karıştırılarak bağlayıcı karışım elde edilmiş olup K1, K2, K3, K4, K5, K6 numuneler elde edilmiştir. Daha sonra aynı oranlarda ağırlıkça %70, %75, %80, %85, %90, %95 çimento ve %30, %25, %20, %15, %10, %5 oranının da UK karışımı ile K7, K8, K9, K10, K11, K12 numuneleri elde edilmiş ve son olarak %70, %75, %80, %85, %90, %95 oranında çimento ile %30, %25, %20, %15, %10, %5 oranında doğal puzolan ile karıştırılarak

K13, K14, K15, K16, K17, K18 numuneleri elde edilmiştir. Su/bağlayıcı=1 oranı sabit tutulup bağlayıcı olarak kullanılacak malzemelerin oransal değişiminin karışım şerbetine etkileri incelenmiştir.

Çizelge 3.6..Bağlayıcı/su=1 1.Ön Karışımlardaki Malzemelerin Ağırlıkları

Karışım Numarası	1m ³ Karışım İçindeki Malzeme Ağırlıkları (kg/m ³)					
	BAĞLAYICI			KATKILAR		
	Çimento	Metal Cürufu	Uçucu Kül	Doğal Puzolan	Bentonit	Su
Referans	675	0	0	0	75	750
K1	641,25	33,75	0	0	75	750
K2	607,5	67,5	0	0	75	750
K3	573,75	101,25	0	0	75	750
K4	540	135	0	0	75	750
K5	506,25	168,75	0	0	75	750
K6	472,5	202,5	0	0	75	750
K7	641,25	0	33,75	0	75	750
K8	607,5	0	67,5	0	75	750
K9	573,75	0	101,25	0	75	750
K10	540	0	135	0	75	750
K11	506,25	0	168,75	0	75	750
K12	472,5	0	202,5	0	75	750
K13	641,25	0	0	33,75	75	750
K14	607,5	0	0	67,5	75	750
K15	573,75	0	0	101,25	75	750
K16	540	0	0	135	75	750
K17	506,25	0	0	168,75	75	750
K18	472,5	0	0	202,5	75	750

DSİ'nin inşaatlarda kullandığı su/bağlayıcı=1 oranında hazırlanan enjeksiyon şerbetlerine alternatif olarak DSİ'nin enjeksiyon şerbetinde kabul ettiği başka bir oran olan bağlayıcı/su=5/4 oranı da kullanılmaktadır. 2. ön aşama çalışmalarında Bağlayıcı/su=5/4 oranında tutulup akışkanlaştırıcı kullanılarak yeni numuneler hazırlanmış, bağlayıcı oranının artması ile ikinci ön çalışma yapımı için hazırlanan karışımların basınç, viskozite ve çökeltme üzerindeki değişimler hakkında bilgi edinilmiştir. İkinci ön çalışma deneylerinde kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranları Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7.Bağlayıcı/su=5/4 2.Ön Karışımlardaki Malzemelerin Ağırlıkları

Karışım Numarası	Karışım İçindeki Malzeme Ağırlıkları (Gr)						
	BAĞLAYICI				KATKILAR		
	Çimento	Metal Cürufu	Uçucu Kül	Tras	Bentonit	Akışkanlaştırıcı	Su
Referans	1400	0	0	0	14	14	1120
K1	1330	70	0	0	14	14	1120
K2	1260	140	0	0	14	14	1120
K3	1190	210	0	0	14	14	1120
K4	1120	280	0	0	14	14	1120
K5	1330	0	70	0	14	14	1120
K6	1260	0	140	0	14	14	1120
K7	1190	0	210	0	14	14	1120
K8	1120	0	280	0	14	14	1120
K9	1330	0	0	70	14	14	1120
K10	1260	0	0	140	14	14	1120
K11	1190	0	0	210	14	14	1120
K12	1120	0	0	280	14	14	1120

İkinci ön aşama çalışması kapsamında hazırlanan karışımlar sonucunda Taguchi L16 yöntemi kullanılarak viskozite, çökeltme, basınç, geçirimsizlik deneylerinde optimum sonucu hedeflenerek enjeksiyon şerbetleri için karma karışım oranları çıkarılmıştır. UK, metal cürufu ve doğal puzolanın farklı oranlarda çimento yerine ikame için kullanılarak elde edilen karışımlarda bağlayıcıların kendi içerisinde ağırlıkça oranları Çizelge 3.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. Enjeksiyon Şerbeti Nihai Bağlayıcı Karışım Oranları

BAĞLAYICI MALZEME ORANLARI				
Karışım Numarası	Uçucu Kül Oranı (%)	Doğal Puzolan Oranı (%)	Metal Cürufu Oranı (%)	Çimento Oranı (%)
REF	0	0	0	100
K2,5P2,5M	0	2,5	2,5	95
K5P5M	0	5	5	90
K7,5P7,5M	0	7,5	7,5	85
K2,5UK2,5M	2,5	0	2,5	95
K2,5UK2,5P	2,5	2,5	0	95
K2,5UK5P7,5M	2,5	5	7,5	85
K2,5UK7,5P5M	2,5	7,5	5	85
K5UK5M	5	0	5	90
K5UK2,5P7,5M	5	2,5	7,5	85
K5UK5P	5	5	0	90
K5UK7,5P2,5M	5	7,5	2,5	85
K7,5UK7,5M	7,5	0	7,5	85
K7,5UK2,5P5M	7,5	2,5	5	85
K7,5UK5P2,5M	7,5	5	2,5	85
K7,5UK7,5P	7,5	7,5	0	85

Çizelge 3.8’de belirtilen oranlarda hazırlanan karışımlar belirtilen oranlarda mikserlerde karıştırılıp kuru bağlayıcı karışımı elde edilmiş daha sonra bağlayıcı karışımın ağırlık %1 oranında bentonit ve %1 oranında akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Elde edilen katı karışım 5/4 bağlayıcı/su oranında karıştırılarak elde edilen karışımlara sırasıyla march hunisi deneyi, çökelme deneyi, priz başlangıç ve priz sonu deneyleri serbest basınç deneyi ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar Taguchi L16 yöntemine göre sinyal/gürültü S/N oranları kullanılarak, çimento yerine ikame edilecek olan UK, metal cürufu, doğal puzolan maddelerinin hangi oranlarda kullanımının en makul sonucu verdiği, kullanılan bu malzemelerin bağlayıcı karışımı içerisindeki oranının artışı veya azalışının ne şekilde karışımı etkilediği hakkında bilgiler vermiştir.

Taguchi yöntemindeki amaç kullanılan malzemelerin optimum oranlarını belirleyip istenilen en uygun sonuçları bulmaktır. En küçük en iyidir bakış açısıyla kullanılan denklem aşağıda Denklem 3.1’de en büyük en iyidir bakış açısıyla kullanılan denklem ise Denklem 3.2.’de belirtilmiştir.

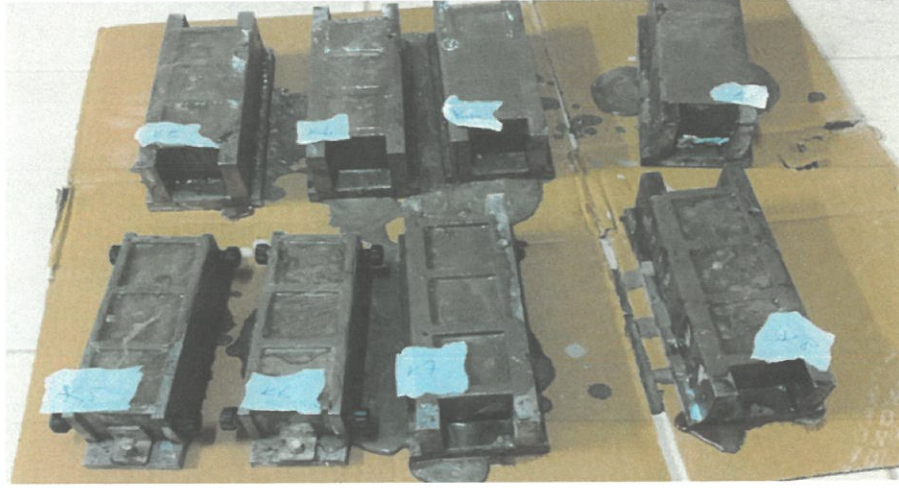
En küçük en iyidir denklem 3.1.

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left((1/n) \sum (y_i^2) \right)$$

En büyük en iyidir denklem 3.2.

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left((1/n) \sum (1 / y_i^2) \right)$$

Hazırlanan numunelerin kalıplara yerleştirilmiş ve priz almış halleri Şekil 3.5. ve Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Hazırlanan Numunelerin Kalıplara Yerleştirilmiş Hali



Şekil 3.6. Hazırlanan Numunelerin Kalıp içerisinde Priz Almış Hali

3.2.2. Karışımlara yapılan testler

Karışım şerbetlerinin özelliklerinin belirlenmesi için hazırlanan numuneler DSİ Jeoteknik Hizmetler Başkanlığının Şartnamelerinden enjeksiyon şartnamesinde belirtilen deneylere tabi tutulmuş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Karışımların özgül ağırlık deneyi, akışkanlığını belirlemek için viskozite deneyi, şerbetin içindeki katı maddelerin zamana göre çökelmesini hesaplamak için çökme deneyi, priz başlangıcı ve bitim sürelerinin tespiti için vicat deneyi, dayanımlarının hesaplanması için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneyler TS EN 445 ve TS EN 447 ye göre gerçekleştirilmiş olup, priz başlangıç ve bitim süre tayini TS EN 196-3'e göre yapılmıştır.

- **Özgöl Ağırlık Deneyi**

Karışımların özgül ağırlığı miktarında DSİ enjeksiyon şartnamesinde belirtildiği üzere $1,5 \text{ gr/cm}^3$ değerini aşmamıştır, hazırlanan karışımların 1000 ml mezür içerisindeki ağırlıkları ölçülerek özgül ağırlığı tespit edilmiştir.

- **Marsh Hunisi Deneyi**

DSİ enjeksiyon şartnamesi gereği karışım şerbetlerinin akışkanlığını belirleyecek deneyleri marsh hunisi ile yapılacağı belirtilmiştir. Marsh hunisi deneyi, enjeksiyon şerbetlerinin akış özellikleri hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Enjeksiyon şerbetlerine yapılan marsh hunisi deneylerinin sonuçları izafi viskozite olarak da değerlendirilmektedir (Şenkaya, 2019).

Marsh hunisi deneyi, enjeksiyon şerbetinin huni altına yerleştiren 1 litre hacmindeki silindir kabı doldurma süresi hesaplanarak şerbetin akışkanlığı hakkında fikrimizin olmasını sağlayan deneydir. Marsh hunisi Şekil 3.7’de gösterildiği gibi üst çapı 152,4 mm ve alt çapı 4,76 mm, 304,8 mm yüksekliğinde bir koniden oluşmaktadır. Enjeksiyonun çıkış borusu ise 55 mm yüksekliğinde ve 4,76 mm çapında koninin alt kısmını oluşturmaktadır. Bu standartlara sahip marsh hunisi ile gerçekleşen deney süresi 26 saniye ile 70 saniye arasında değişmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, DSİ’nin enjeksiyon işleri yönetmeliklerindeki marsh hunisi deneyinde kullandığı sınır değeri referans alınmış ve sınır değer 35 saniye olarak belirlenerek, tez çalışmasında yapılan marsh hunisi deneylerinde akış süresinin 35 saniye altında olması hedeflenmiştir.



Şekil 3.7. Marsh Hunisi

Deneyler ASTM-D6910 standartlarına göre yapılmış olup karışım 1000 devir/dk kapasiteli mikserde hazırlanarak marsh hunisine 1500 mL hacminde dökülmüştür. Bu işlemler yapılırken huni dik durumda ve alt deliği kapalı tutulmuştur. Alt deliğin

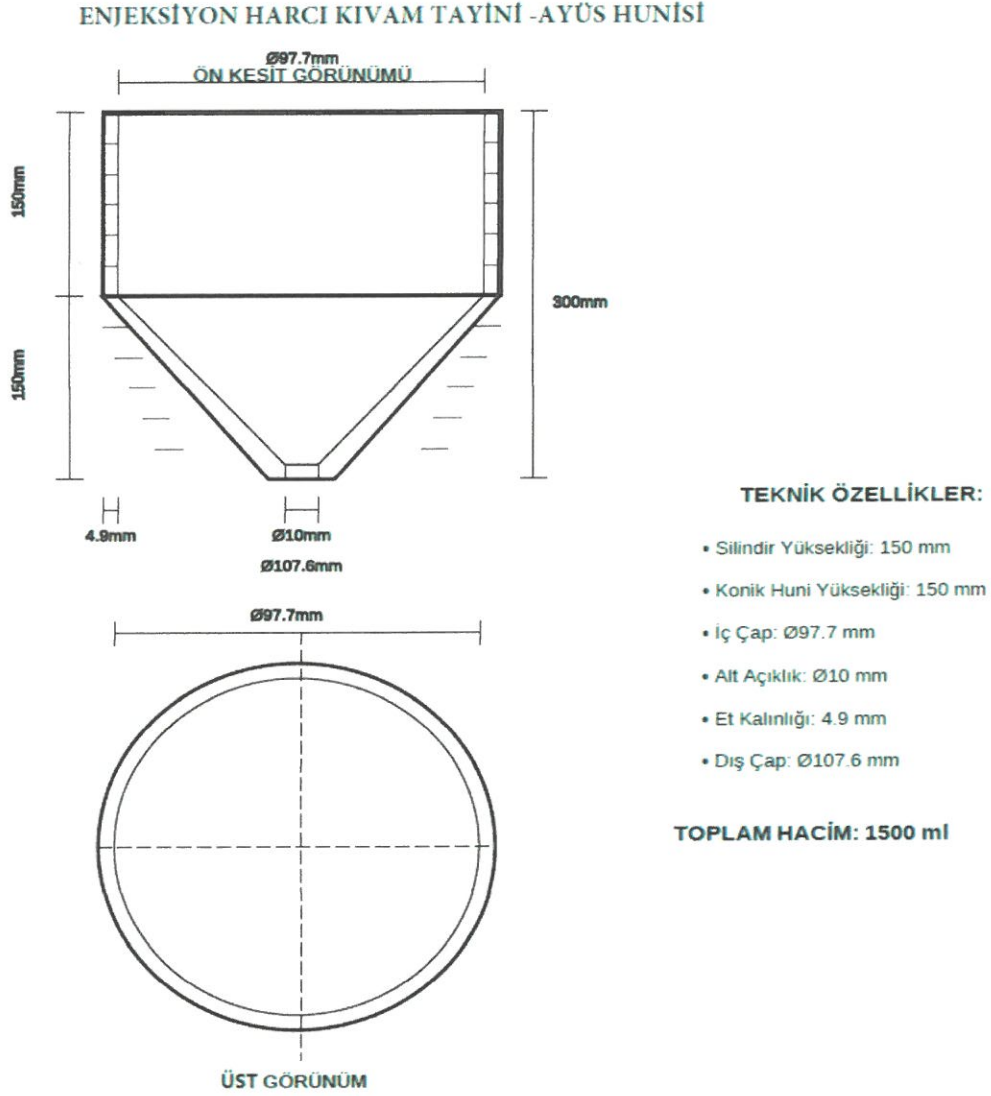
açılması ile kronometre çalıştırılmış ve huninin altındaki silindir kabın 1000 mL hacmine kadar dolması için geçen süreler ölçülmüştür.

- **Ayüs Hunisi Deneyi**

Hazırlanan karışım şerbetlerinin akışkanlık tayini DSI enjeksiyon şartnamesinde belirtilen marsh hunisi ile yapılmış ancak marsh hunisi sadece viskozite açısından bilgi verdiği için çalışma kapsamında hazırlanan enjeksiyon şerbetleri için yayılma çapına dayalı kıvam sınıflandırması yapılamamıştır. Bu eksikliği giderebilmek için enjeksiyon harçlarının taze halindeki kıvam özelliklerini standart ve tekrarlanabilir şekilde belirlemeye olanak sağlayacak sabit hacimli, düşürmeli ve yayılma temelli çalışan bir ölçüm aparatı olan Ayüs Hunisi geliştirilerek viskozite-kıvam ilişkisini yayılma çapı üzerinden yorumlayabilen bir test metodolojisi üretilmiştir. Üretilen Ayüs Hunisinin görünüşü Şekil 3.8’de özellikleri Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Ayüs Hunisi Yayılma Deneyi



Şekil 3.9. Ayüs Hunisi Teknik Özellikleri

Ayüs Hunisi deney aşamaları aşağıda belirtildiği gibi 5 aşamada gerçekleşmektedir.

1. Hazırlık: Karışım standarda uygun şekilde hazırlanır ve aparata dökülmeden önce 60 saniye dinlendirilir.
2. Döküm: 1500 ml hacminde karışım, aparatın içine aktarılır.
3. Serbest Düşüş: Aparat, ani şekilde kaldırılır ve harcın yayılması gözlemlenir.
4. Ölçüm: En geniş ve dik açılı ikinci genişlik ölçülür. Ortalama Yayılma = $(X + Y) / 2$
5. Kayıt: Ölçüm süresi, yayılma çapı ve ortam sıcaklığı kaydedilir.

Deney yapıldıktan sonra çıkan yayılma sonucu denklem 3.3'te verilen formül ile enjeksiyon şerbetinin viskozite süresi hesaplanmış olup çıkan sonuçlar Çizelge 3.9'da belirtilen değer aralıklarına göre yorumlanarak enjeksiyon şerbetinin yorumlaması yapılır.

$$\text{Viskozite (sn)} = 0.0299 \times \text{Yayılma}^2 - 3.5841 \times \text{Yayılma} + 142.7141 \text{ (Denklem 3.3.)}$$

Çizelge 3.9. Ayūs Hunisi Enjeksiyon Şerbeti Uygunluk Değerlendirmesi

Yayılma Çapı (mm)	Viskozite Aralığı (sn)	Harç Tipi / Uygulama	Uygunluk Değerlendirmesi	Açıklama
≥ 180	< 30	Mikroçimento, kimyasal enjeksiyon	Çok akışkan - düşük stabilite	Yüksek penetrasyon ama duraylılık düşebilir
165 – 179	30 – 40	Standart çimento harcı	Akışkan - düşük tıkanma riski	İyi pompalanabilir, geniş dolgu aralıkları için
150 – 164	40 – 50	Uçucu kül, silis katkılı harçlar	Orta kıvam - kontrollü akış	En yaygın performans bölgesi
135 – 149	50 – 65	Lif katkılı / tiksotropik harçlar	Yoğun kıvam - sınırlı akış	Stabilite yüksek ancak pompaj sınırlı olabilir
< 135	> 65	Polimer modifiye / özel katkılar	Akmayan harç - özel durumlar	Düşük akış, yüksek duraylılık amaçlı

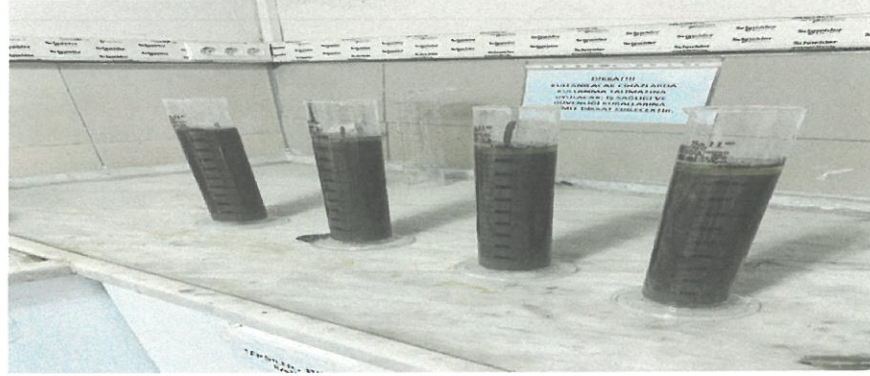
• Çökeltme Deneyi

Çökeltme deneyi hazırlanan her karışımın içerisindeki katı maddelerin zamana göre çökeltme miktarının karışım hacmine yüzde olarak oranını bulmak için yapılan deneydir. Deneyler 1000 ml hacminde, çapı 6 cm olan 1 mm seviye göstergeli cam mezürler ile yapılmıştır. Deney sonucu 2 saatlik süre sonunda çökeltme miktarının %5 i geçmemesi istenmektedir. Karışımın içerisindeki asılı parçacıklar yer çekimi etkisiyle ve parçacığın çapının karesiyle orantılı bir şekilde yer çekimi yönünde yer değiştirmektedir. Enjeksiyon şerbetinin enjeksiyon işlemi sırasında katıları çökerse harç boruları tıkar ve daha fazla akamaz bu da yapılan işlemin başarısız olmasına sebep olur.

Yapılan deneyler ASTM 940 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10'da gösterilen deney aşamaları aşağıda belirtilmektedir.

- İlk olarak deneyler $23 \pm 2^{\circ} \text{C}$ ortamda gerçekleştirilmelidir.
- Mezür titreşimsiz düz bir zeminde olmalıdır.
- Karışım harcı 1000 ml lik dereceli silindire yerleştirilir ve ilk okuma yapılır
- İlk 60 dakikada 15 dakikalık okumalar ve ikinci 60 dakikada her 10 dakikada bir okuma yapılır.

- 2 saatin sonunda üstte toplanan suyun toplam hacmin %5'inden eksik olmasına bakılır.



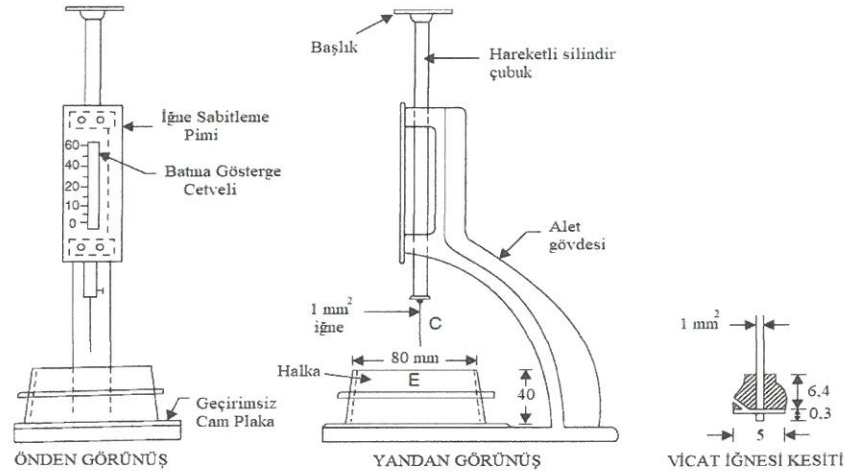
Şekil 3.10.Çökeltme Deneyleri

- **Priz Başlangıç ve Priz Bitim Süresinin Tayini**

Hazırlanan enjeksiyon karışımlarının priz başlangıç ve bitiş sürelerinin belirlenmesi için vicat iğnesi yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.11’de vicat iğnesinin ön ve yan görünüşleri Şekil 3.12’de vicat deney cihazı gösterilmektedir. Deneyler TS-EN-196 standartlarına göre gerçekleştirilmiş olup deney aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- İlk olarak bakılması gereken deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığının 23^0 - 25^0 C olarak ayarlanmalıdır.
- Deneyde kullanılan bağlayıcı malzeme 500 gr olarak hazırlanıp S/Ç oranı 0.25 olarak belirlemiştir. Su ve bağlayıcı 90 saniye + 90 saniye olmak üzere toplam 3 dakika mikser ile karıştırılır.
- Yüksekliği 40 mm olan vicat halkası, altında cam plaka olacak şekilde yağlanır ve cam plakanın üzerine konulur sonra mikserde hazırlanan çimento harcı vicat halkasına yerleştirilir.
- Vicar iğnesi çimento harcının yüzeyine kadar indirilir, sabitleme vidası sıkılarak sabitlenir.
- 40 mm yüksekliğe sahip vicat halkası şekil 3.12’de gösterildiği gibi çimento hamuru ile tamamen doldurulur ve vicat iğnesi batırılmadan önce yarım saat beklenir daha sonra iğne batırılır ve batırıldıktan sonra 30 saniye beklenip okuma yapılır.

- Priz başlangıç süresinin belirlenmesi için iğne her 15 dakikada bir çimento hamuruna batırılır ve batma değeri 25 mm olduğunda ilk priz zamanı tespit edilmiş olur.
- Priz bitiş zamanı tespiti ise bağlayıcı olarak hazırlanan harcın suyla teması ile iğnenin yüzeyde dairesel bir iz çıkarmadığı ve batmanın 0,5 mm den daha düşük seviyede kalmasına kadar geçen süredir.



Şekil 3.11. Vicat iğnesi deney düzeneği (Şenkaya 2019)



Şekil 3.12. Vicat iğnesi deneyi

• Basınç Dayanım Deneyi

Hazırlanan enjeksiyon şerbetlerinin basınç dayanım değerlerinin tespiti DSİ'nin enjeksiyon şartnamesi gereği olarak 50*50*50 mm'lik 3'er adet küp numuneler şeklinde hazırlanarak su içinde küre tabi tutulmuştur. 7 ve 28 gün su içerisinde bekletilen numuneler basınç deneylerine tabi tutularak kırılmıştır. 28 günlük numunelerin kırımı sonucunda en az 10 MPa=100 kg/cm² basınç dayanımını sağlaması istenmektedir. Deneyler ASTM C-109 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Çimento esaslı şerbetler 50x50x50 mm³ boyutlarındaki kalıplarda üretilmiş, 2 gün kalıpta bekletildikten sonra 18 °C sıcaklıkta kür havuza alınmış olup Şekil 3.13’de gösterildiği gibi 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.13. Numunelerin Basınç Altında Kırılma Anı

- **Beton Geçirimsizlik Deneyi**

Uçucu kül, metal cürufu ve doğal puzolan ikamesi ile hazırlanan numunelerin basınçlandırılmış su altında su işleme derinliği özelliklerine bakılıp ikame malzemelerin suya karşı geçirimsizlik direnci etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler TS EN 12390-8 standartlarına göre yapılmıştır. Kenar uzunluğu 150 mm olan küp numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler en az 28 gün boyunca 23⁰C su içerisinde kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra alınan numuneler Şekil 3.15’te gösterildiği gibi beton geçirimsizlik test cihazına yerleştirilmiş ve 72 saat süreyle 5 bar su basıncı uygulanmıştır.

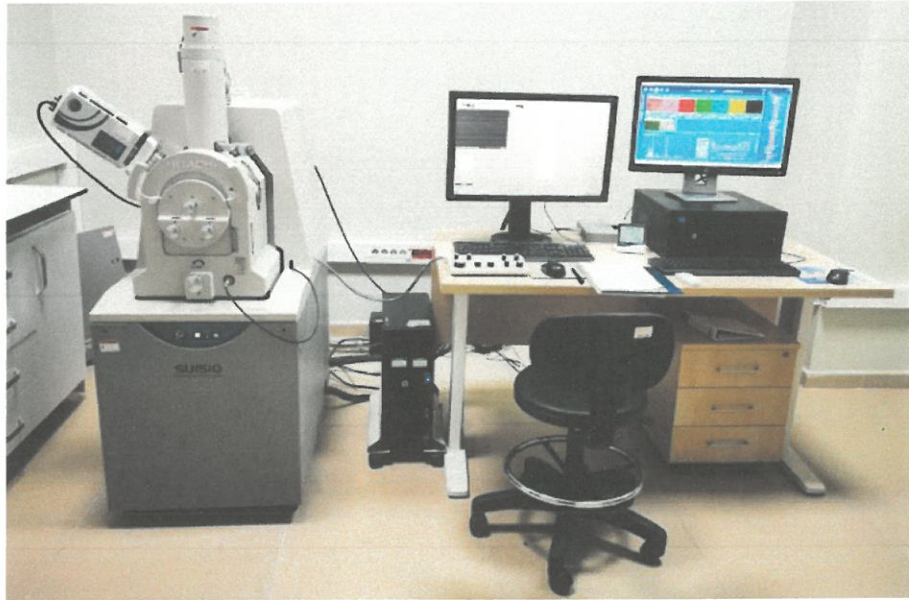


Şekil 3.15. Beton Geçirimsizlik Testi

72 saat su basıncı uygulanan numuneler cihazdan çıkarılıp yüzeydeki fazla su temizlenerek basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde ikiye bölünmüştür. Numunenin bölünmesiyle ortaya çıkan numune yüzeyinin, su işleyen alan sınırlıları çizilmiş ve suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek en yakın mm ye yuvarlamak suretiyle sonuçlar kaydedilmiştir.

- **SEM Analizi**

SEM (taramalı elektron mikroskobu) analiz çimento enjeksiyon şerbetlerinin iç yapısında meydana gelen mikro yapıları görüntülemek için kullanılmıştır. Harçlardan laboratuvarda hassas kesme cihazı ile kesilen 10x10x1 mm boyutlarındaki numunelerin SEM görüntüleri alınarak mikroyapı incelemesi için hazırlanmıştır. Analizler için hazırlanan 28 yaş günü numuneleri 3 gün 45 °C etüvde kurutulmuş ve nemden korunmak için alkol içerisinde bekletilmiştir. Numunelerin elektrik iletkenliğini arttırmak için altın-paladyum karışımı kullanılmıştır. Analiz çalışmaları Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) laboratuvarlarında Şekil 3.14’de gösterilen Hitachi-SU 1510 cihazı ile yürütülmüştür.



Şekil 3.14. Çalışmada kullanılan SEM-EDS cihazı (Lıban İ 2022)

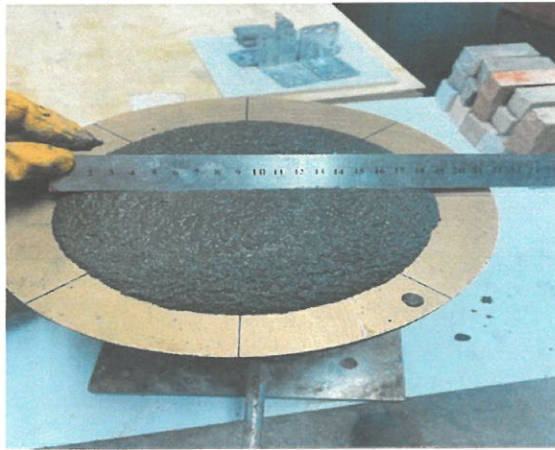
Yapılan analizler karışımlarda kullanılan metal cürufu, uçucu kül ve doğal puzolanın çimento ve birbiri ile olan etkileşimi ve bağlayıcılık özellikleri hakkında bilgi vermiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında enjeksiyon şerbetleri hazırlanmadan önce kullanılan ikame malzemeleri tek tek %0'dan %30'a kadar çimento yerine ikame edilmiş birinci ön çalışma numuneleri hazırlanarak basınç, çökeltme ve marsh hunisi deneylerine tabi tutulmuş olup viskozite ve çökeltmedeki olumsuz sonuçlardan ötürü ikinci ön çalışma numuneleri malzeme oranı en yüksek %20 oranında olacak şekilde tekrar çimento yerine ikame edilerek yeni numuneler hazırlanıp aynı deneylere tabi tutulmuştur. Daha sonra birinci ve ikinci ön çalışma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre metal cürufu, UK, doğal puzolan malzemeleri aynı anda kullanılarak optimum oranda çimento yerine ikame edilerek nihai karışım şerbetleri hazırlanmıştır. Hazırlanan nihai karışım şerbetleri basınç, çökeltme, marsh hunisi, priz başlangıç ve priz sonu, beton geçirimsizlik deneylerine tabi tutulmuş ve nihai karışım şerbetlerinin içyapı özelliklerini belirlemek için SEM analizi yapıp çıkan sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

4.1. Puzolanik Aktivite Sonuçları

Hazırlanan karışımlarda çimento yerine ikame etmek için kullanılan malzemeler metal cürufu, UK ve doğal puzolanın puzolanik aktivite indeksleri hesaplanmıştır. İlk olarak 1375 gr kum, 500 gr çimento ve 242 gr su ile hazırlanan referans Şekil 4.1'de gösterildiği gibi sarsma tablasına yerleştirilmiş ve 15 saniye içerisinde 25 kere sarsma uygulanarak yayılması ölçülmüştür.



Şekil 4.1. Karışım Malzemesi Yayılma Deneyi

Referans alındıktan sonra karışımda kullanılan 500 gr çimentodan 100 gr azaltarak çimento yerine sırasıyla 100 er gram ikame malzemeler eklenmiş ve her birinin tek tek yayılması hesaplanmıştır. Metal cürufunun %1 daha az, UK'nın 42,5 gr su ilavesiyle %2 daha az ve son olarak doğal puzolanın 40 gr su ilavesi ile aynı değerde yayılma gösterdiği görülmüştür.

Yayılma deneyini ardından her malzemeden 3 farklı numuneler 5x5x5 cm kaplara alınarak 28 günlük basınç dayanım testine tabi tutulmuş ve çıkan sonuçların ortalaması, su katkısı ve puzolanik aktivite indeksi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1.Karışım Malzemeler Puzolanik Aktivite Basınç Testi Sonuçları

NUMUNELER	Basınç(Mpa)	Su Katkısı (gr)	Dayanım Aktivite İndeksi (%)
REFERANS	38,87	—	100
UK	28,33	42,5	73
DOĞAL PUZOLAN	23,71	40	61
METAL CÜRUFU	28,48	—	73

Metal cürufu ve UK'nın doğal puzolana göre daha yüksek aktivite indeksine sahip olduğu, harçların işlenebilirliği ve standart kıvama erişilmesi için metal cürufun UK ve doğal puzolana göre daha az suya ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir.

Çimento yerine ikame edilen malzemeler için TS EN 450'ye göre istenilen dayanım aktivite indeksi %75'in altına düşmemelidir. (Demir İ. ve ark. 2008) UK ve volkanik tüflerin puzolanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapmış oldukları araştırmada kullanmış oldukları uçucu külün %75 olarak istenilen dayanım aktivite indeksini karıştılamadığı Ca(OH)_2 ve uçucu kül arasında puzolanik reaksiyonu hızlandırmak için farklı metotların kullanıldığı belirterek uçucu külün inceliği arttıkça puzolanik aktivitenin de artacağı belirlemişlerdir. Tez kapsamında yapılan çalışmada metal cürufunun ve uçucu külün dayanım aktivite indeksi %73'te kalmış olup malzeme inceliği arttıkça dayanım aktivite indeksinin %75 istenilen değere çıkacağı düşünülmektedir.

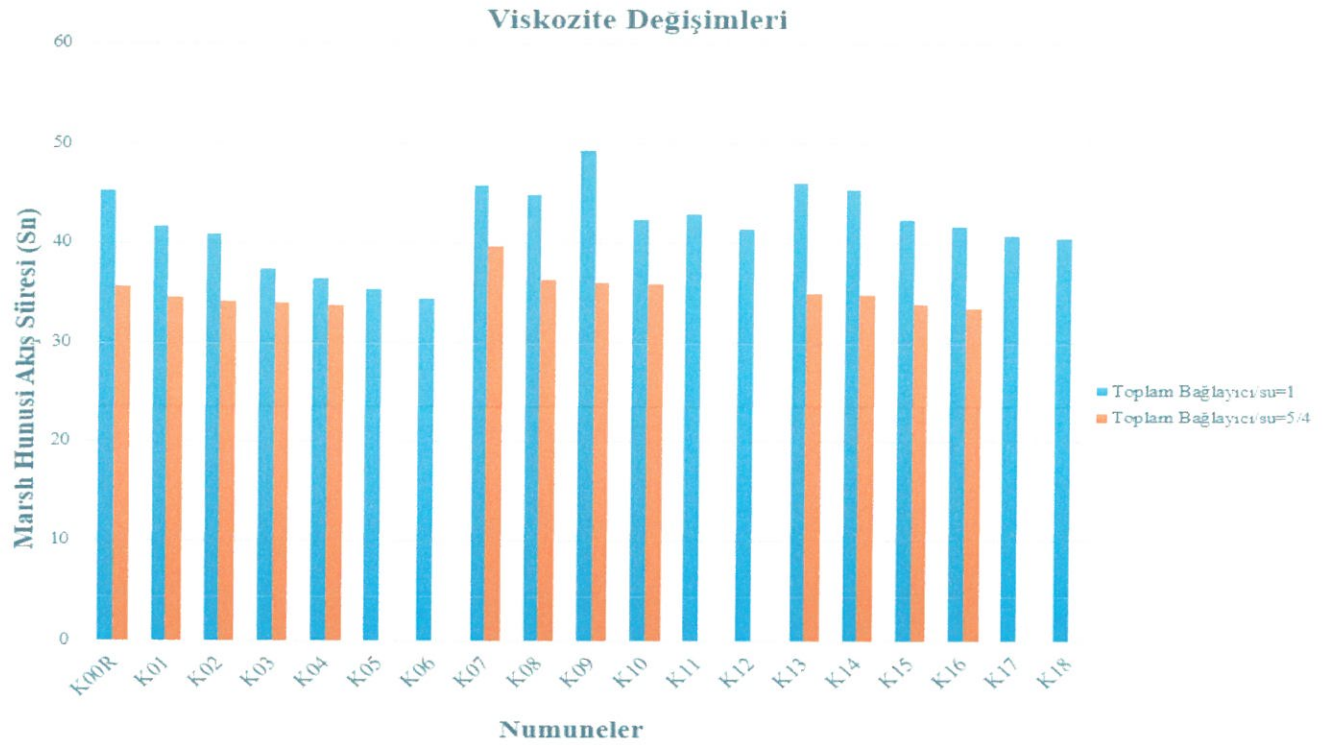
4.2. Marsh Hunisi Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında ilk olarak çimento yerine ikame edilecek malzemeler tek olarak farklı oranlarda ikame edilmiştir. Bağlayıcı/su oran 1 olarak hazırlanan

karışımlarda akışkanlaştırıcı kullanılmamış daha sonra bağlayıcı/su=5/4 oranında hazırlanan karışımlarda akışkanlaştırıcı kullanılmış ve bağlayıcı/su=1 olan birinci ön aşama deneyi sonuçlarına göre bağlayıcı/su=5/4 olan 2.ön aşama deneylerinde malzeme oranları %0 dan %20 ye kadar alınmış olup %25 oranında malzeme içeren K05 ve %30 oranında ikame malzeme içeren K06 numuneleri hazırlanmamış olup sonuç çizelgelerinde değeri 0 olarak gösterilmiştir. Alınan sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Marsh hunisi ile yapılan akışkanlık testinde 35 saniye sınırı baz alınmış olup karışımların 35 (± 2) saniye ile huniden akması istenmiştir. Alınan ön karışım sonuçlarına göre metal cürufun kullanımının artışı yüksek özgül ağırlığı sebebiyle akışkanlığı arttırmıştır. Enjeksiyon karışımlarında UK kullanımı arttıkça akma süresinin azalmaktadır (Tan ve ark. 2023). Küresel şekilleri sayesinde pürüzsüz UK parçacıkları, betonda kayganlaştırıcı etki sağlar ve böylece betonun viskozitesini azaltır (Nayak ve ark. 2022). Yapılan deneylerde UK kullanımının artması akış süresini azaltmış olup bu sonuçları desteklemiştir. Doğal puzolan kullanımı çimentodan daha fazla su gerektirir. Bu, çimentoya kıyasla daha geniş özgül yüzey alanlarına ve tüm katkı maddelerinin tane boyutlarına bağlıdır (Spychal E. ve Vyšvařil M. 2023). Yapılan akışkanlık deneylerinde enjeksiyon şerbetinde doğal puzolan kullanımının artışının akışkanlığı azalttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. Bağlayıcı/su=1 ve Bağlayıcı/su=5/4 Akışkanlık Değişimi Sonuçları

	NUMUNELER	Bağlayıcı/su=1	Bağlayıcı/su=5/4
Referans	K00R	45,26	35,6
Metal Cürufu	K01	41,68	34,53
	K02	40,88	34,12
	K03	37,36	33,94
	K04	36,41	33,67
	K05	35,34	0,00
	K06	34,36	0,00
Uçucu Kül	K07	45,81	36,65
	K08	44,88	36,31
	K09	44,31	36,01
	K10	42,26	35,8
	K11	42,89	0,00
	K12	41,41	0,00
Doğal Puzolan	K13	46,04	35,96
	K14	46,47	36,28
	K15	47,35	36,83
	K16	47,64	37,17
	K17	47,72	0,00
	K18	48,49	0,00



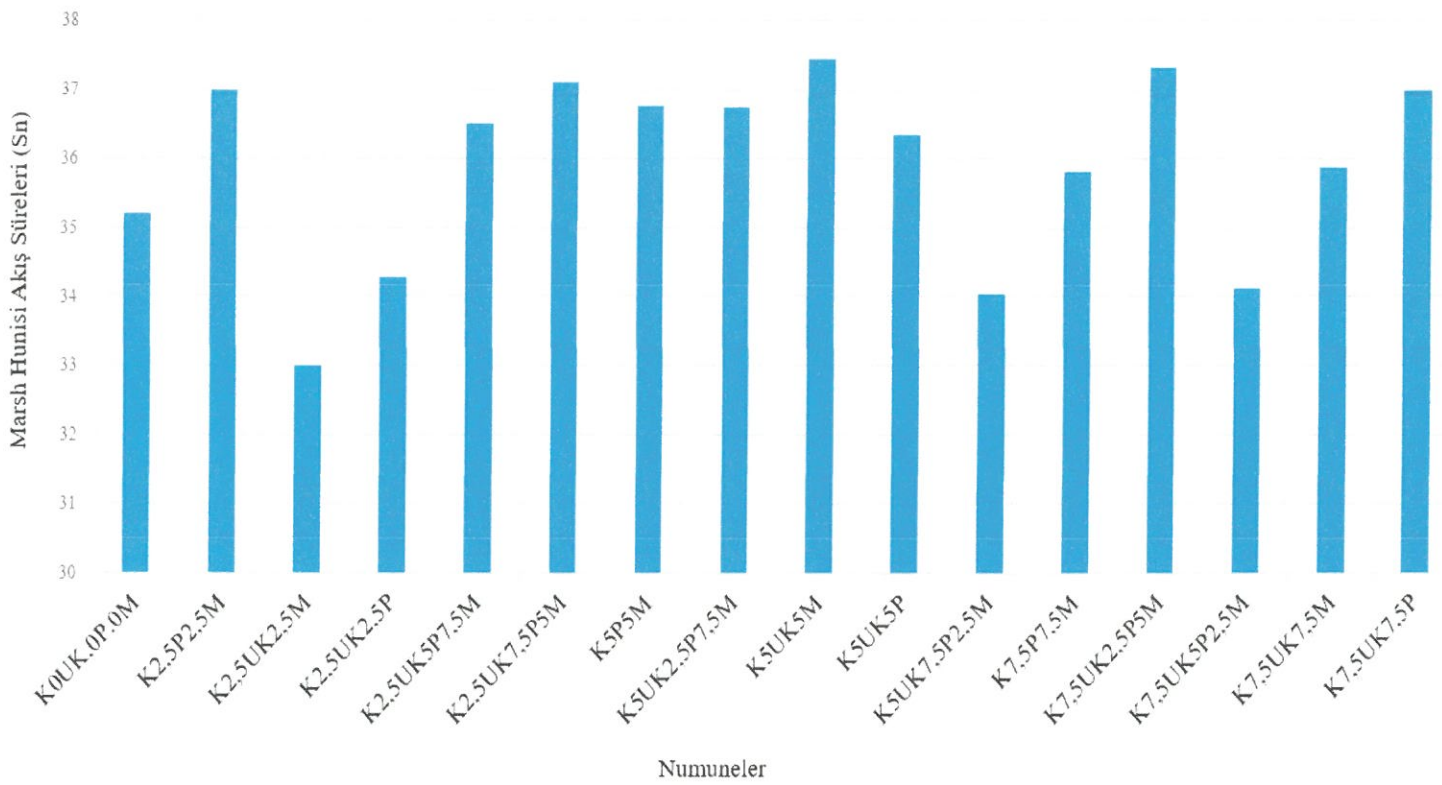
Şekil 4.2. Bağlayıcı/su=1 ve Bağlayıcı/su=5/4 Akışkanlık Değişimi

Ön karışımların sonucu elde edilen neticelere göre hazırlanan nihai şerbet karışımlar marsh hunisi testine alındığında 33 saniye ile 37,44 saniye arasında değişen sonuçlar bulunmuştur. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.3. ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3.Nihai Karışım Numuneleri Akışkanlık Değişimi

Karışım Numarası	Viskozite (sn)
REF	35,2
K2,5P2,5M	37
K5P5M	36,75
K7,5P7,5M	35,81
K2,5UK2,5M	33
K2,5UK2,5P	34,27
K2,5UK5P7,5M	36,49
K2,5UK7,5P5M	37,11
K5UK5M	37,44
K5UK2,5P7,5M	36,74
K5UK5P	36,34
K5UK7,5P2,5M	34,03
K7,5UK7,5M	35,87
K7,5UK2,5P5M	37,33
K7,5UK5P2,5M	34,12
K7,5UK7,5P	36,99

Karişım Numuneleri Akışkanlık Değişimi

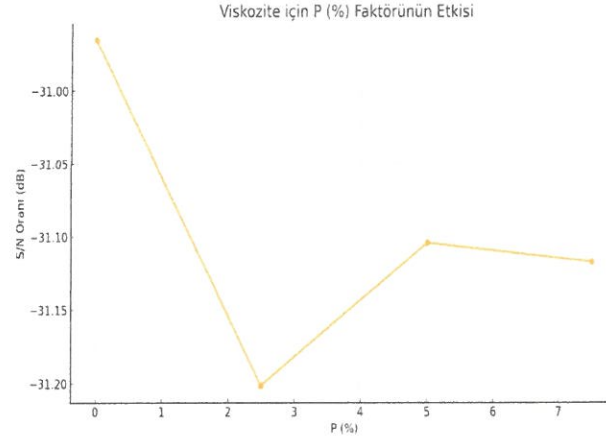


Şekil 4.3.Nihai Karişım Numuneleri Akışkanlık Sonuçları

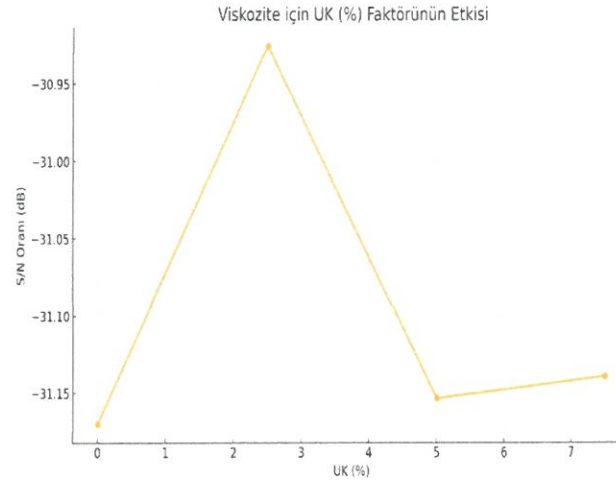
Nihai karişımlar için Taguchi L16 yöntemi ile en düşük en iyi denklemi kullanılmış ve S/N sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiş ikame malzemelerin S/N grafikleri Şekil 4.4., 4.5., ve 4.6.'da gösterilmiştir. En iyi karişımın %2,5UK, %0P ve %2,5M oranları ile elde edileceği saptanmıştır.

Çizelge 4.4. Viskozite S/N Oranları

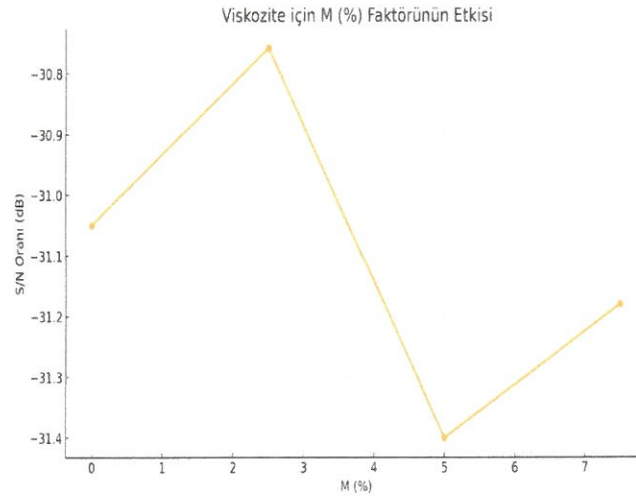
Seviye	Viskozite S/N		
	UK (%)	P (%)	M (%)
0	-31,17	-30,97	-31,05
2,5	-30,93	-31,2	-30,76
5	-31,15	-31,1	-31,4
7,5	-31,14	-31,12	-31,18



Şekil 4.4. Puzolanın Viskozite S/N Oranına Etkisi



Şekil 4.5. Uçucu külün Viskozite S/N Oranına Etkisi



Şekil 4.6. Metal Cürufun Viskozite S/N Oranına Etkisi

• Ayüs Hunisi Deneyi Sonuçları

Hazırlanmış olan enjeksiyon şerbetlerinin marsh hunisi deneyleri ile viskoziteleri değerlendirildikten sonra Ayüs Hunisi ile yayılma tablasındaki sonuçları değerlendirilmiş ve şerbetlerin kıvam tayini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar marsh hunisi deneyi sonuçları ile beraber Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5.Ayüs Hunisi Yayılma Sonuçları

KARIŞIM ADI	Viskozite	YAYILMA (cm)		
	Marsh Hunisi (sn)	X Kordinatı	Y kordinatı	Ortalama(cm)
REF	35.2	54	53	53.5
K2,5P2,5M	37	62	60	61
K5P5M	36.75	58.5	54	56.25
K7,5P7,5M	35.81	66	61	63.5
K2,5UK2,5M	33	61	63	62
K2,5UK2,5P	34.27	62	57	59.5
K2,5UK5P7,5M	36.49	56.5	58	57.25
K2,5UK7,5P5M	37.11	69	67	68
K5UK5M	37.44	68	68	68
K5UK2,5P7,5M	36.74	65	64	64.5
K5UK5P	36.34	60	60	60
K5UK7,5P2,5M	34.03	55	56	55.5
K7,5UK7,5M	35.87	64	65	64.5
K7,5UK2,5P5M	37.33	56	53	54.5
K7,5UK5P2,5M	34.12	60	62	61
K7,5UK7,5P	36.99	55	55	55

Elde edilen sonuçlara göre hazırlanmış olan karışımların her birinin yayılma sonuçları 180 mm'den büyük gelmiş ve bütün karışımların kıvam uygun değerlendirmesi sonucu çok akışkan ve düşük stabilite olarak belirlenmiştir.

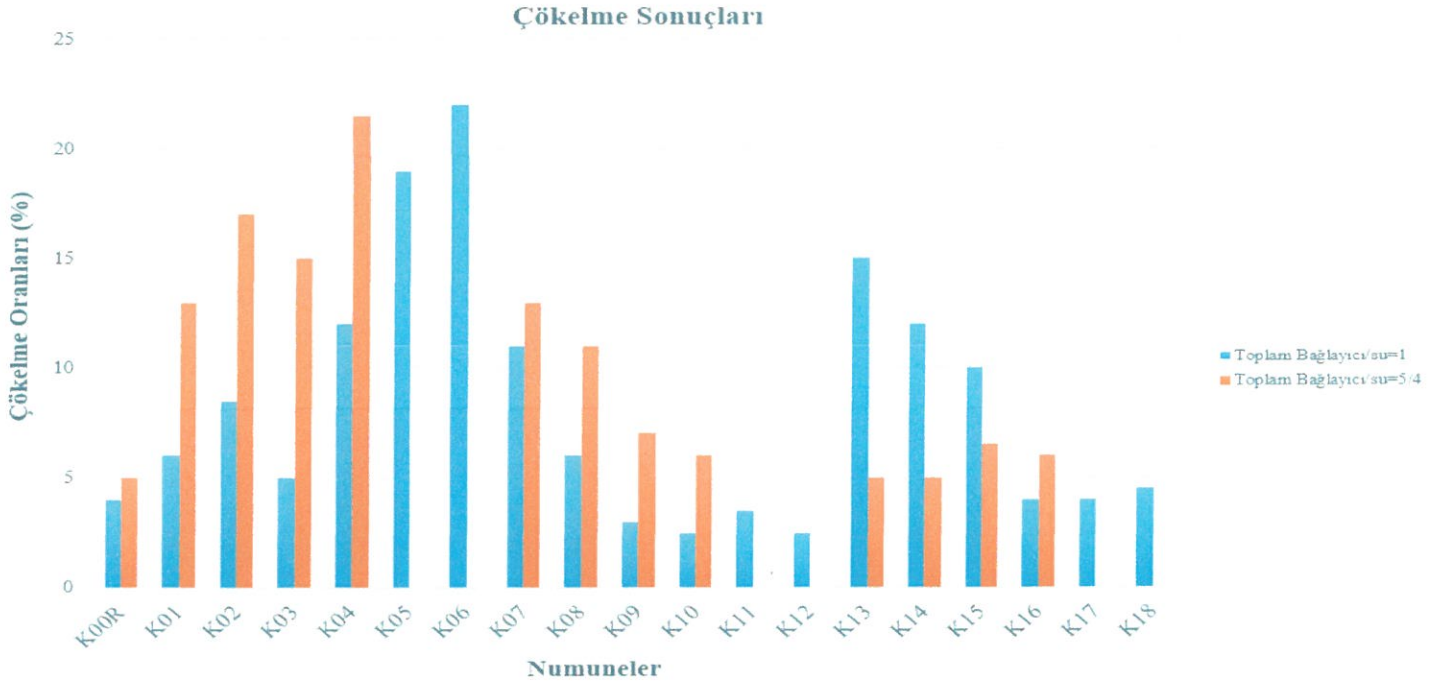
Metal cürufu, doğal puzolan ve uçucu külün çimento içerisinde ikame olarak kullanılması enjeksiyon şerbetlerinin yayılma miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Metal cürufu kullanımının, doğal puzolan ve uçucu küle göre, uçucu kül kullanımının da doğal puzolana göre daha fazla yayılma sağladığı tespit edilmiştir. Hem metal cürufunun hem de uçucu külün çimento içerisinde %5 oranlarında ikame edilmesiyle en fazla yayılmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir. Doğal puzolanın karışımlarda ikame malzemesi olarak kullanılmasında yayılmaya olan etkisinin metal cürufu ve UK ikame oranlarının değişimiyle farklı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. En fazla yayılma sonuçları K2,5UK7,5P5M ve K5UK5M karışımlarında elde edilmiştir.

4.3. Çökelme Deneyi Sonuçları

Tez Çalışması kapsamında ikame malzemelerin kullanımının enjeksiyon şerbetlerine etkisini belirlemek için ilk olarak ön çalışma sonuçları elde edilmiştir. Bağlayıcı/su oranı 1 ve 5/4 oranında hazırlanan karışımlarda ikame malzemelerin oransal olarak arttırılmasının çökelmeye olan etkileri incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.6. ve Şekil 4.7’te gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre metal cürufu kullanımının artması cürufun yüksek özgül ağırlık sebebiyle çökelmeyi arttırdığı tespit edilmiştir. UK ve doğal puzolanın özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığından daha düşük olması sebebiyle bu iki malzemenin çimento içerisindeki ikame oranının artmasıyla enjeksiyon şerbeti karışımlarında meydana gelen çökelmenin azaldığı tespit edilmiştir. Bağlayıcı/su oranı 5/4 olduğunda Doğal puzolanın oransal değişiminin çökelme oranına fazla bir etki etmediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Bağlayıcı/su=1 ve Bağlayıcı/su=5/4 Çökelme Sonuçları Değişimi

	NUMUNELER	Bağlayıcı/su=1	Bağlayıcı/su=5/4
Referans	K00R	4,0	5,0
Metal Cürufu	K01	6,0	13,0
	K02	8,5	17,0
	K03	5,0	15,0
	K04	12,0	21,5
	K05	19,0	0,0
	K06	22,0	0,0
Uçucu Kül	K07	11,0	13,0
	K08	6,0	11,0
	K09	3,0	7,0
	K10	2,5	6,0
	K11	3,5	0,0
	K12	2,5	0,0
Doğal Puzolan	K13	15,0	5,0
	K14	12,0	5,0
	K15	10,0	6,5
	K16	4,0	6,0
	K17	4,0	0,0
	K18	4,5	0,0

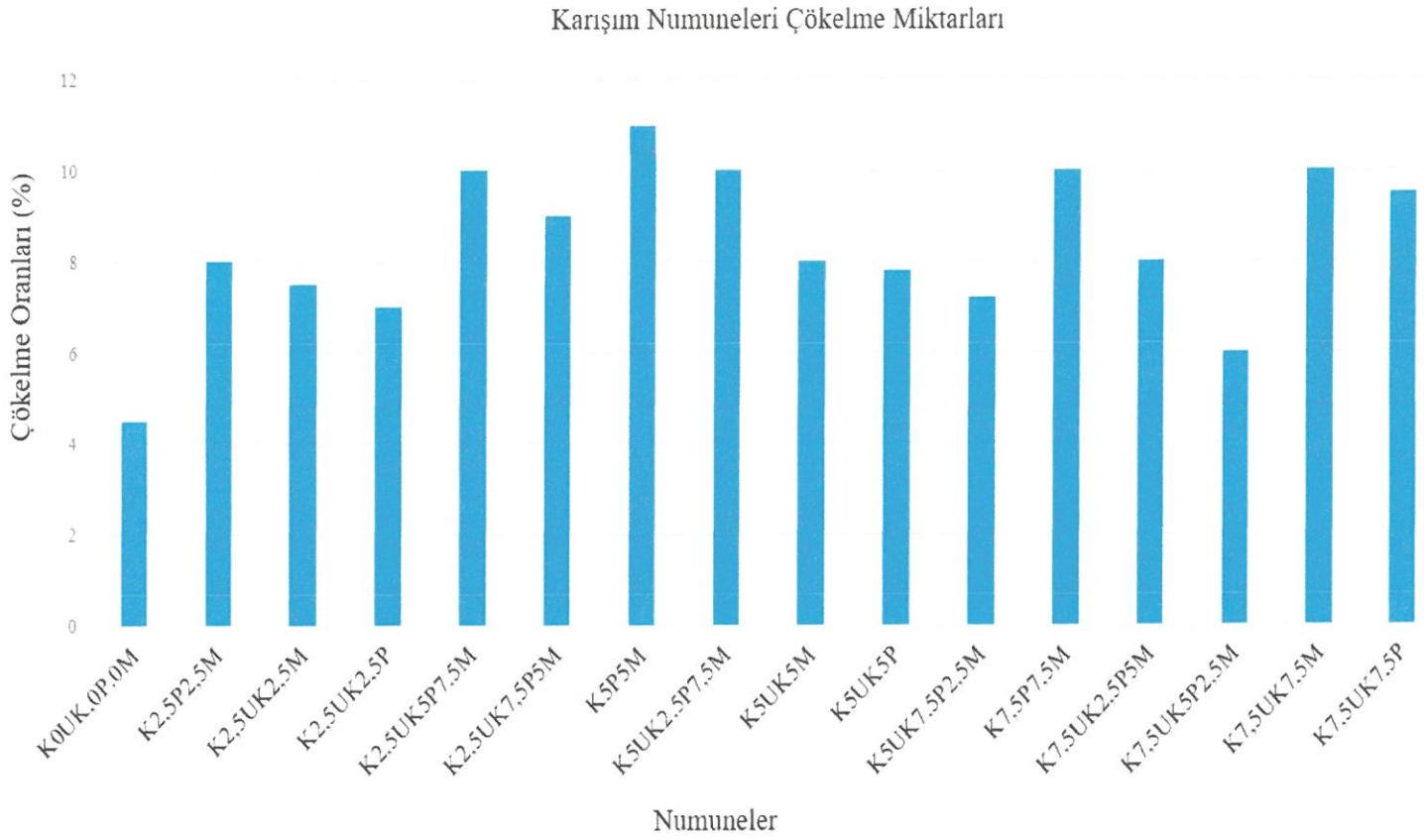


Şekil 4.7.Bağlayıcı/su=1 ve Bağlayıcı/su=5/4 Çökeltme Sonuçları

Ön çalışma deneyleri sonucu elde edilen verilere göre Taguchi L16'ya göre en düşün en iyi yöntemi kullanılarak hazırlanan nihai enjeksiyon şerbeti karışımlarında metal cürufu, uçucu kül, ve doğal puzolan oranları %7,5 oranını aşmayacak şekilde hazırlanarak %5 ve %11 oranı arasında çökeltme sonuçları elde edilmiştir. Metal cürufunun doğal puzolandan, doğal puzolanın ise uçucu külden daha fazla çökmeye sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Çıkan sonuçlar Çizelge 4.7. ve Şekil 4.8'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.7.Nihai Karışım Numuneleri Çökeltme Sonuçları Değişimi

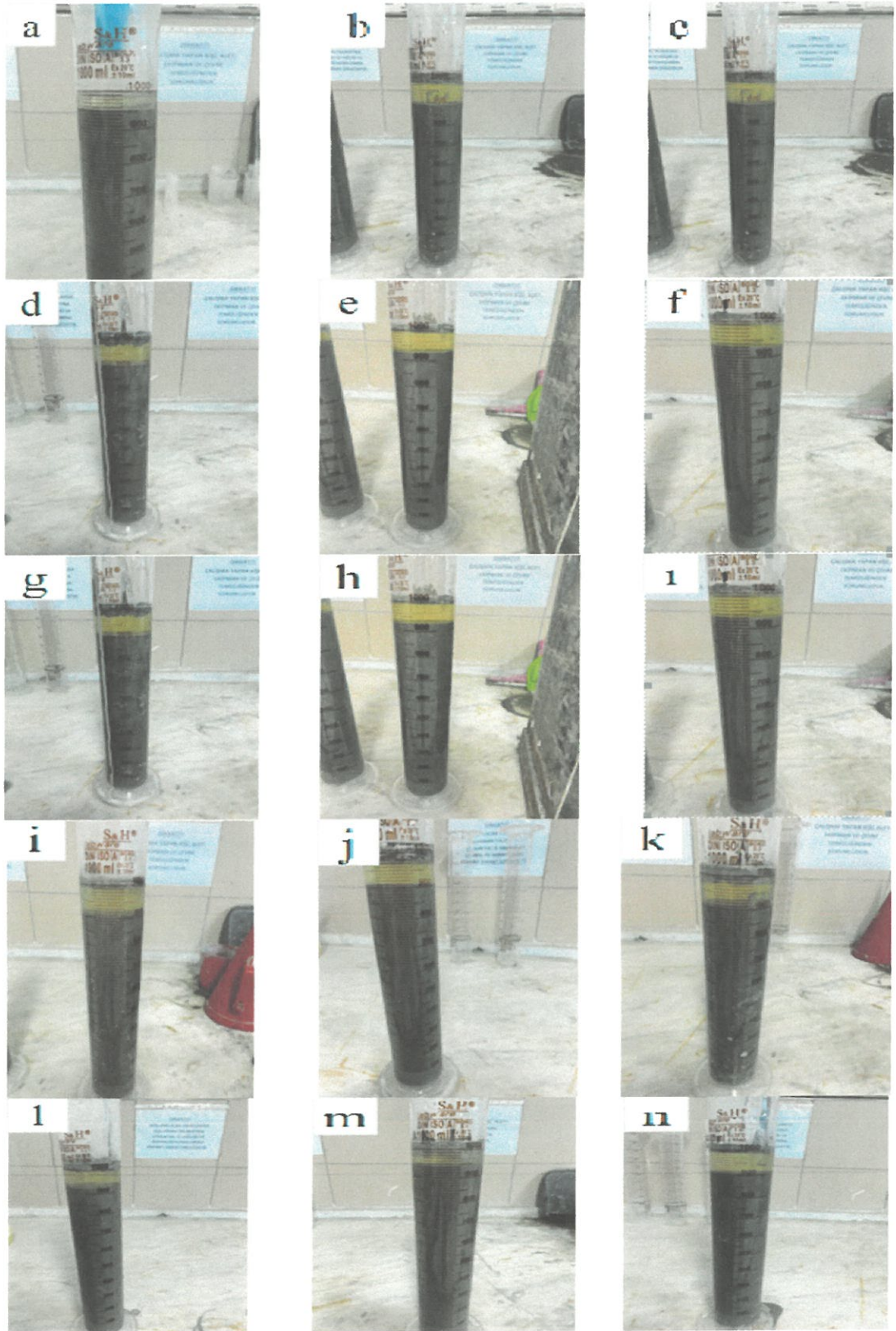
Karışım Numarası	Çökeltme (%)
REF	4,5
K2,5P2,5M	8
K5P5M	11
K7,5P7,5M	10
K2,5UK2,5M	7,5
K2,5UK2,5P	7
K2,5UK5P7,5M	10
K2,5UK7,5P5M	9
K5UK5M	8
K5UK2,5P7,5M	10
K5UK5P	7,8
K5UK7,5P2,5M	7,2
K7,5UK7,5M	10
K7,5UK2,5P5M	8
K7,5UK5P2,5M	6
K7,5UK7,5P	9,5



Şekil 4.8.Nihai Karışım Numuneleri Çökelme Sonuçları

Nihai karışımların sonuçlarına göre en iyi çökelme sonuçları K2,5UK2,5P ve K5UK7,5P2,5M karışımlarından elde edilmiştir. %5UK, %7,5P ve %2,5M içen K5UK7,5P2,5M karışım %7,2 çökelme oranı ile istenilen en düşük çökelme oranını verirken %15 ikame malzemesi içermesiyle ekonomik açıdan en uygun karışım oranlarını oluşturmaktadır.

Yapılan çökelme deneyleri ve meydana gelen çökelme sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.

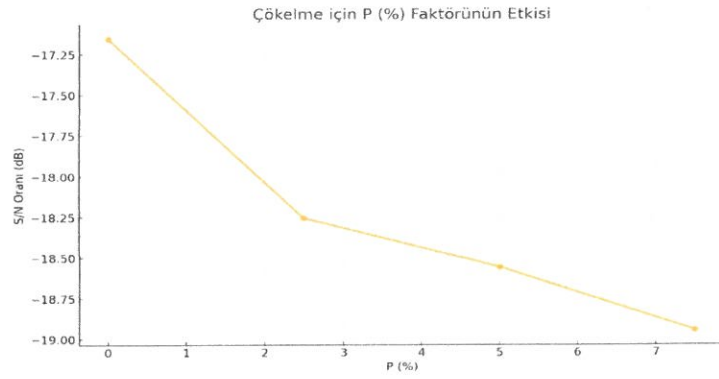


Şekil 4.9. Nihai Karışım Numuneleri Deneyleri REF (a), K2,5P2,5M (b), K5P5M (c), K7,5P7,5M (d), K2,5UK2,5M (e), K2,5UK2,5P (f), K2,5UK5P7,5M (g), K2,5UK7,5P5M (h), K5UK5M (i), K5UK2,5P7,5M (j), K7,5UK7,5M (k), K7,5UK2,5P5M (l), K7,5UK5P2,5M (m), K7,5UK7,5P (n)

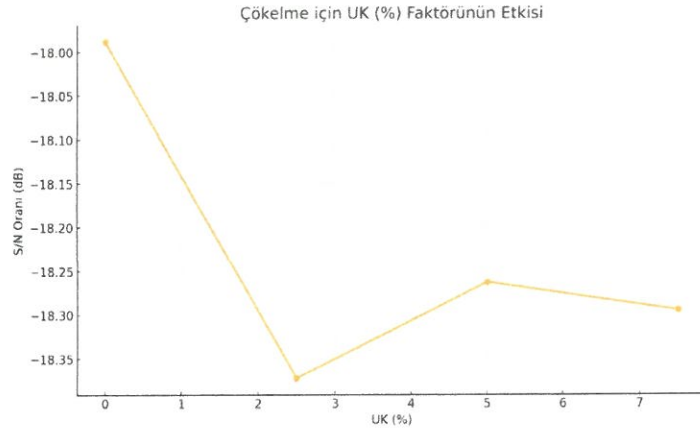
Nihai karışımlar için Taguchi L16 yöntemi ile en düşük en iyi denklemi kullanılmış ve S/N sonuçlar Çizelge 4.8’de verilmiş olup ikame malzemelerin S/N grafikleri Şekil 4.10., 4.11., ve 4.12.’de gösterilmiştir. Çökelme için en iyi karışımın %2,5UK, %0P ve %2,5M oranları ile elde edileceği saptanmıştır.

Çizelge 4.8.Çökelme S/N Oranları

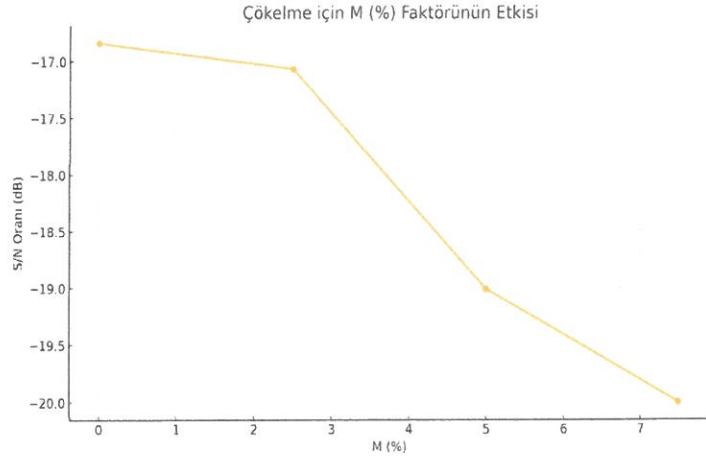
Seviye	Çökelme S/N		
	UK (%)	P (%)	M (%)
0	-17,99	-17,16	-16,84
2,5	-18,37	-18,26	-17,07
5	-18,26	-18,56	-19,01
7,5	-18,29	-18,95	-20



Şekil 4.10. Puzolanın Çökelme S/N Oranına Etkisi



Şekil 4.11. Uçucu Külün Çökelme S/N Oranına Etkisi



Şekil 4.12. Metal Cürufun Çökeltme S/N Oranına Etkisi

4.4. Priz Başlangıç ve Priz Bitim Süresinin Tayini Sonuçları

Hazırlanan şerbet numunelerinin priz başlangıç ve priz sonu süreleri hesaplanmış Çizelge 4.9. ve Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Priz başlangıç sürelerinde 60 dakikadan az olmaması priz bitiş süresinin de 150-300 dakika arasında olması hedeflenmiştir.

Karışım şerbetlerinde uçucu kül oranının artmasıyla birlikte normal kıvamdaki su ihtiyacı azalır ve priz süresi uzar (Li C. Ve ark. 2022). Seyitömer ve Çayırhan Termik Santrallerinden elde edilen UK’ler ile ikame edilen çimento harcının, ikamesi olmayan çimento harcına kıyasla priz başlama ve priz sonu sürelerinin arttığı tespit edilmiştir. (Çelik M. H. ve ark. 2003). Şehir şebeke suyu ile hazırlanan çimento pastalarının priz süreleri, UK ikame oranıyla doğru orantılı bir şekilde arttığı tespit edilmiştir (Dorum A. 2004).

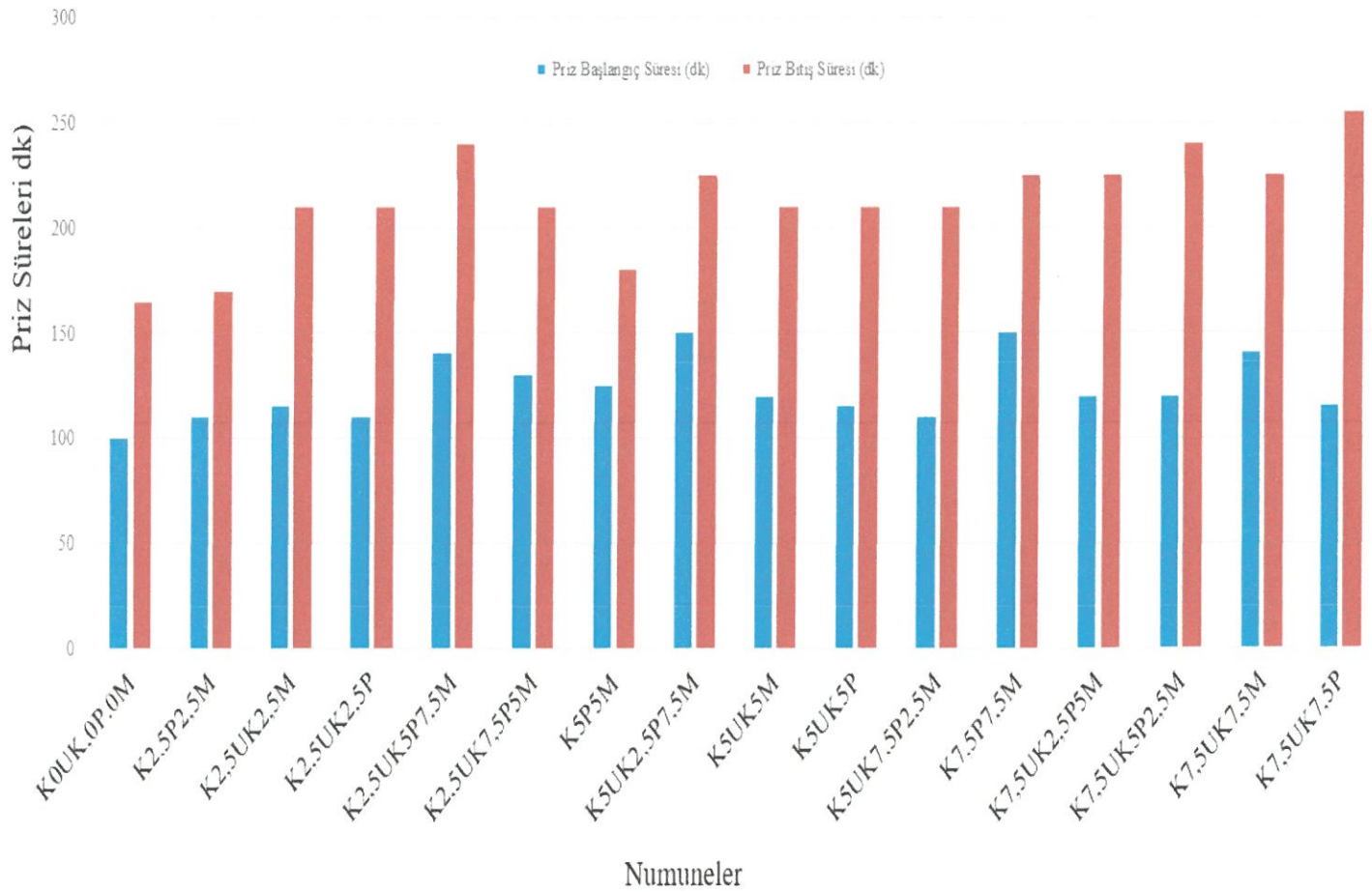
Koçak Y., (2010) doğal puzolan olan tras ikamesi ile hazırlanan çimento şerbetlerinde ikame yapılmamış çimento şerbetlerine kıyasla %6 oranında priz sürelerinin uzadığını tespit etmiştir. (Erdoğan A. ve ark. 2011) Tras ile yaptıkları çalışmada çimento içerisinde tras ikame edilmesiyle çimento harcının priz süresinin uzadığını tespit etmişlerdir. Çimento yerine doğal puzolan kullanılması, ihtiyaç duyduğu fazla karıştırma suyu nedeniyle priz sürelerini artırır ve numunelerin hidrasyon ısısını azaltır (Senhadji Y. ve ark. 2012).

Elde edilen deney sonuçlarına göre çimento yerine ikame edilen malzeme oranları arttıkça priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin uzadığı ancak priz başlangıç ve bitiş sürelerinin hedeflenen süre değerlerini yakaladığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9. Nihai Karışım Numuneleri Priz başlangıç ve Priz Sonu Süreleri

Karışım Numarası	Priz Başlangıç Süresi (dk)	Priz Bitiş Süresi (dk)
K0UK,0P,0M	100	165
K2,5P2,5M	110	170
K5P5M	125	180
K7,5P7,5M	150	225
K2,5UK2,5M	115	210
K2,5UK2,5P	110	210
K2,5UK5P7,5M	140	240
K2,5UK7,5P5M	130	210
K5UK5M	120	210
K5UK2,5P7,5M	150	225
K5UK5P	115	210
K5UK7,5P2,5M	110	210
K7,5UK7,5M	140	225
K7,5UK2,5P5M	120	225
K7,5UK5P2,5M	120	240
K7,5UK7,5P	115	255

Karışım Numuneleri Priz Başlangıç ve Priz Sonu Süreleri



Şekil 4.13.Nihai Karışım Numuneleri Priz başlangıç ve Priz Sonu Süreleri

4.5. Basınç Deneyi Sonuçları

Birinci ön çalışma kapsamında çimento yerine ikame edilen malzemelerin oransal olarak değiştirilerek hazırlanan bağlayıcı/su=1 oranındaki numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Birinci ön aşama çalışmalarında yapılan deneyler sonucunda 28 günlük basınç dayanımların standart sapması 2,19 Mpa bulunmuştur.

Çizelge 4.10.Bağlayıcı/su=1 Numune Basınç Dayanım sonuçları

	NUMUNELER	İkame Oranı	7 GÜNLÜK BASINÇ	28 GÜNLÜK BASINÇ
Referans Metal Cürufu	K00R	0	7,63	10,63
	K01	5	6,26	8,52
	K02	10	6,34	7,57
	K03	15	4,61	8,53
	K04	20	4,26	7,79
	K05	25	2,72	5,58
	K06	30	2,73	5,02
Uçucu Kül	K07	5	5,27	11,21
	K08	10	5,44	11,95
	K09	15	4,70	8,83
	K10	20	4,89	8,11
	K11	25	4,22	7,00
	K12	30	3,80	6,85
Doğal Puzolan	K13	5	6,93	11,58
	K14	10	5,23	10,74
	K15	15	4,57	8,13
	K16	20	4,71	7,48
	K17	25	3,57	7,16
	K18	30	2,56	5,47

Birinci ön aşama çalışmaları kapsamında 1/1 oranında hazırlanan numuneler sonucunda basınç dayanımın DSİ enjeksiyon şartnamesinde istenilen 10 Mpa basınç dayanımı karşılamadığı saptanmış ve ikinci ön çalışma çalışmalarına geçilip bağlayıcı/su=5/4 oranında yeni karışımlar hazırlanarak sonuçları incelenmiş ve çıkan sonuçlar Çizelge 4.11'de 7 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 4.14 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 4.15'de gösterilmiştir. 2. ön çalışma kısmında yapılan deneyler sonucunda 28 günlük basınç dayanımların standart sapması 3,51 Mpa bulunmuştur.

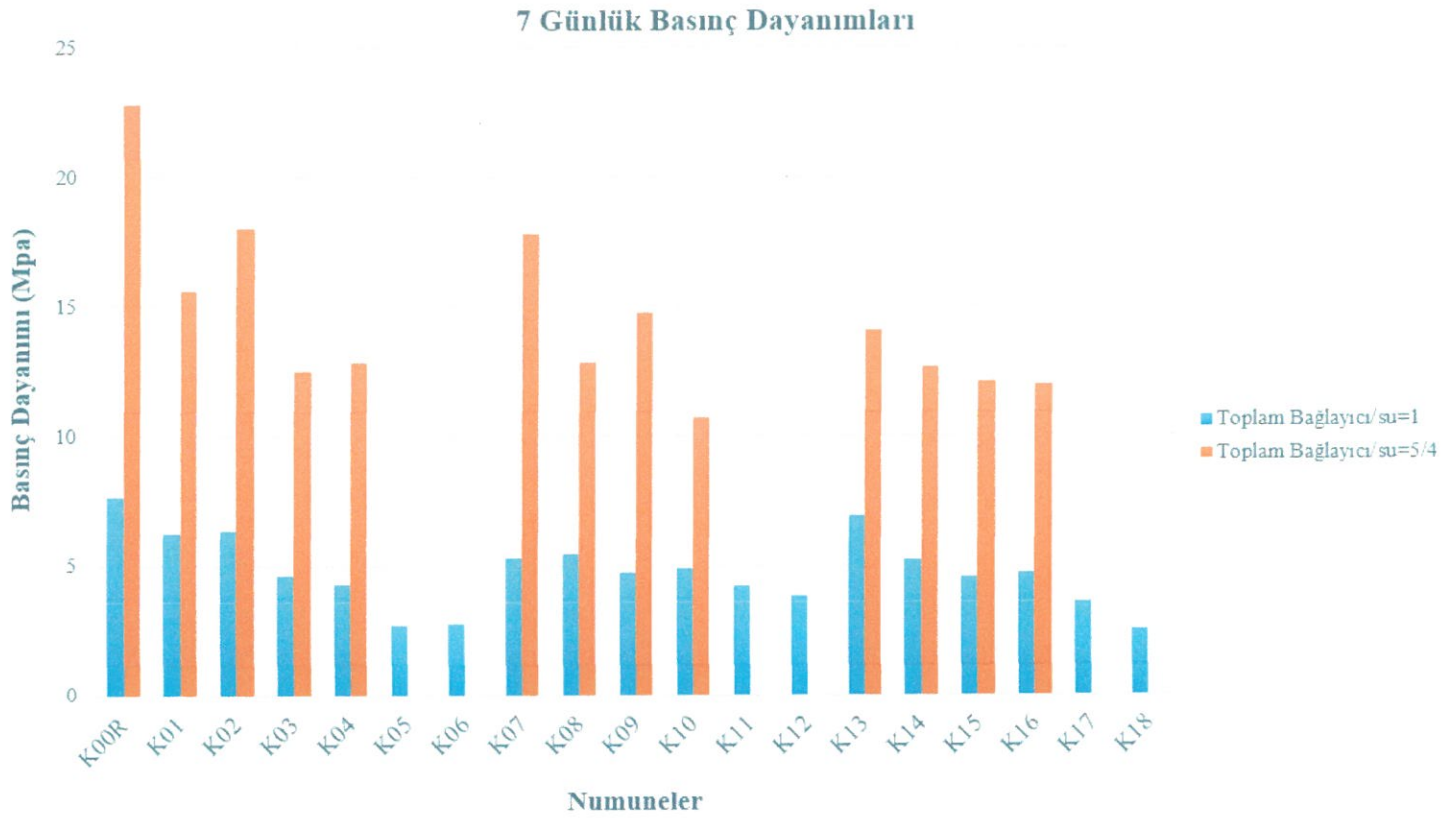
Dorum A. ve Tekin İ., (2004) yaptıkları araştırmada UK ikame oranının artmasıyla çimento harcının dayanımının düştüğünü tespit etmişlerdir. UK ikame oranının artmasıyla çimento harçlarının basıncı düşmektedir (Li C. ve ark. 2022).

Koçak Y., (2010) doğal puzolan olan tras ikamesi ile hazırlanmış olduğu çimento harçlarının basınç değişimlerini incelemiştir. %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranında tras ikamesi ile hazırlanan karışım harçlarında tras ikamesi olmayan harca göre ikame oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. (Erdoğan A. ve ark. 2011) Tras ile yaptıkları çalışmada çimento içerisinde %10 tras ikame edilmesiyle çimento harcının basınç dayanımında artış olduğu ancak çimento harcına %10'u aşan oranda tras ikame edildiğinde basınç dayanımının düştüğünü tespit etmişlerdir. Çimento yerine yüksek oranda puzolan kullanılması, basınç dayanımında önemli bir azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir (Senhadji Y. ve ark. 2012).

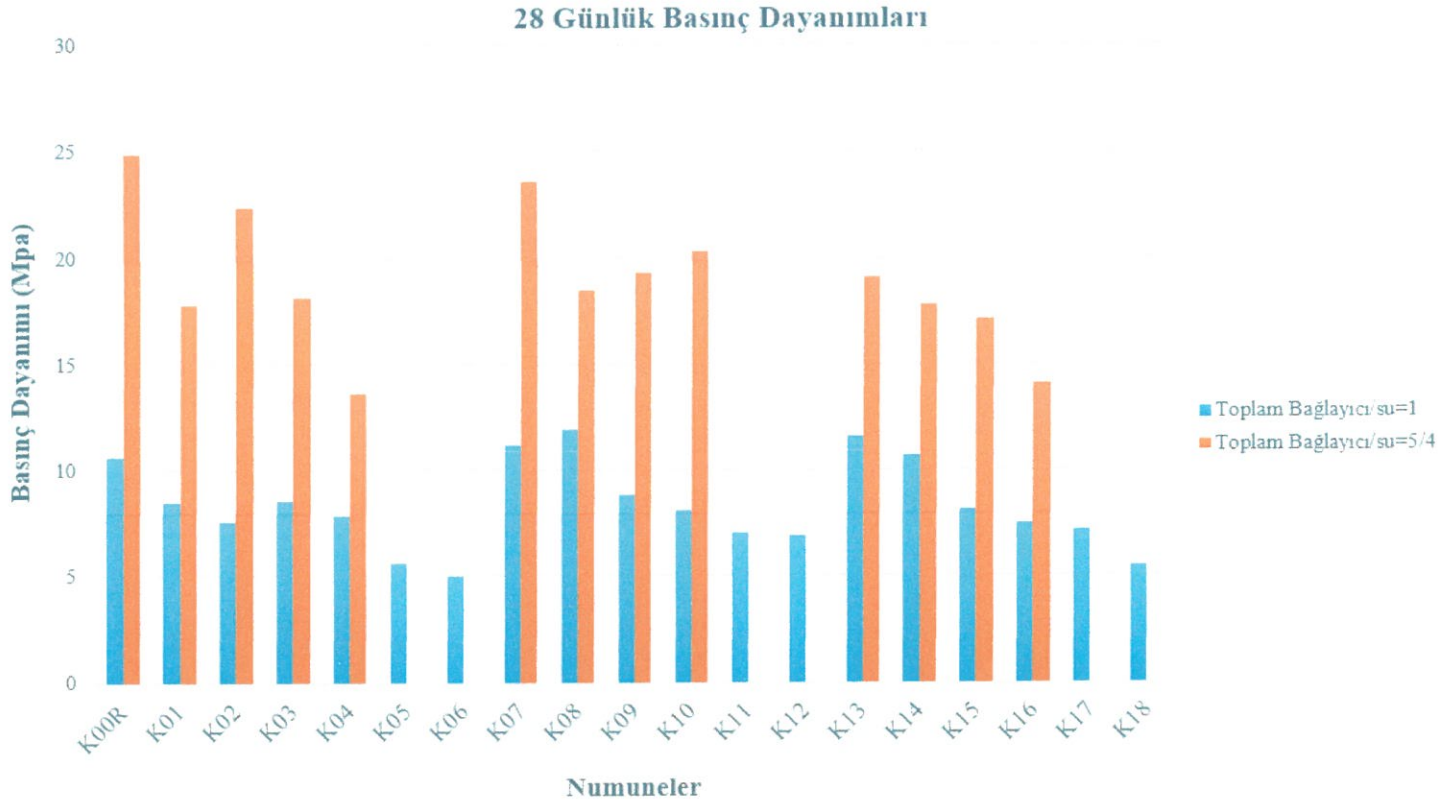
Yapılan deneyler sonucunda metal cürufunun oranının artmasıyla basınç dayanımının düştüğü en yüksek dayanımı %10 ikame ederek elde edildiği, UK kullanımının artışı ve doğal puzolanının artması ile basınç dayanımında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.11. Bağlayıcı/su=5/4 Numune Basınç Dayanım Sonuçları Değişimi

	NUMUNELER	İkame oranı	7 GÜNLÜK BASINÇ	28 GÜNLÜK BASINÇ
Referans Metal cürufu	K00R	0	22,82	24,85
	K01	5	15,63	17,81
	K02	10	18,00	22,38
	K03	15	12,54	18,16
	K04	20	12,84	13,62
Uçucu Kül	K05	5	17,80	23,60
	K06	10	12,88	18,46
	K07	15	14,78	19,28
	K08	20	10,73	20,27
Doğal Puzolan	K09	5	14,11	19,05
	K10	10	12,69	17,77
	K11	15	12,12	17,09
	K12	20	12,00	14,08

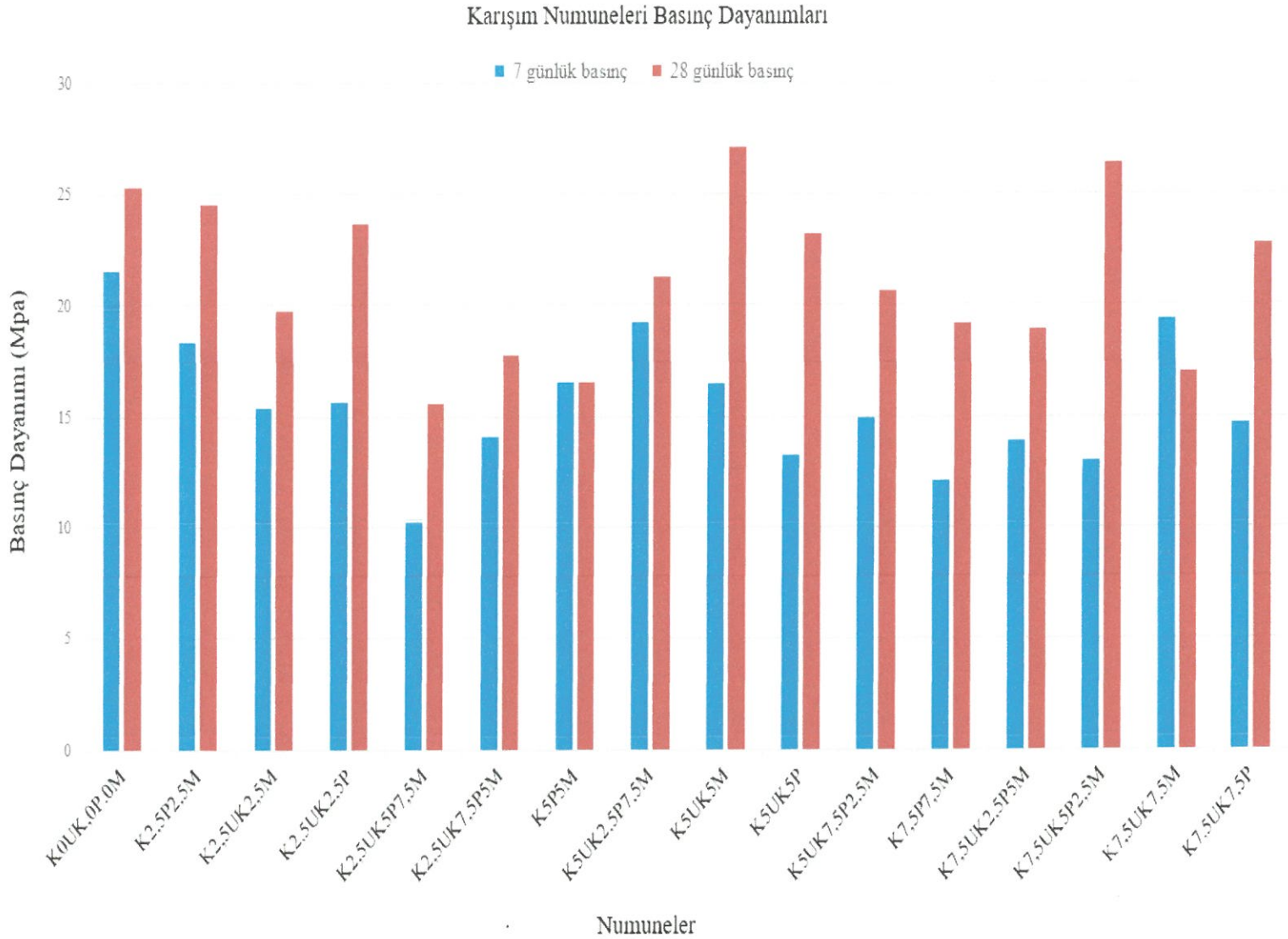


Şekil 4.14. Bağlayıcı/su=5/4 7 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları



Şekil 4.15. Bağlayıcı/su=5/4 28 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları

Yapılan ön çalışmalar sonucunda hazırlanan nihai karışımlardan alınan üçer numunenin ortalama 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 4.11 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Her bir karışım istenilen 10 Mpa basınç dayanımını sağlamış ve en yüksek basınç dayanımı K5UK5M %5 UK ve %5 metal cürufu ikame edilerek sağlanmıştır.

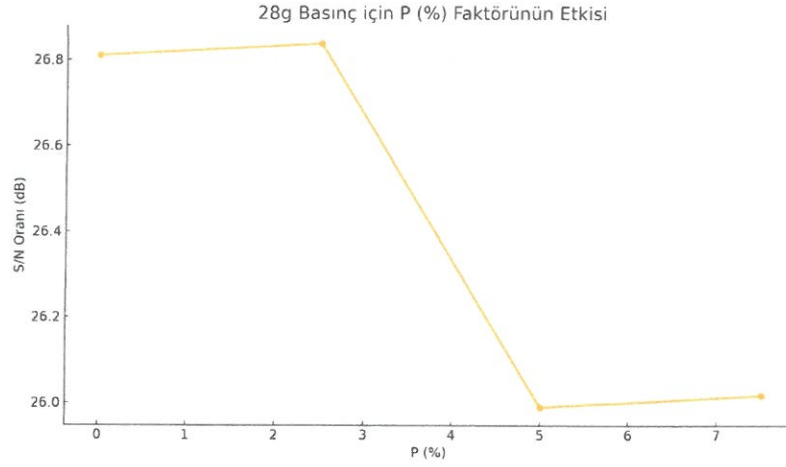


Şekil 4.16.Nihai Karışım Numuneleri 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları

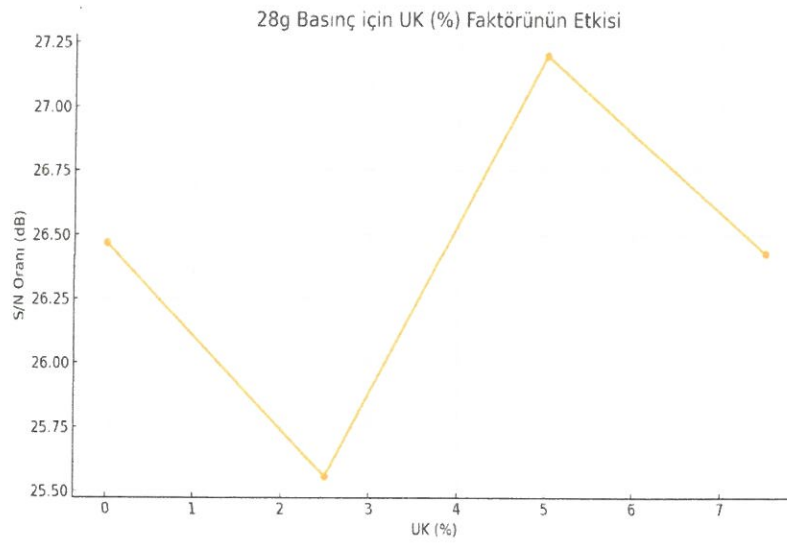
Nihai karışımlar için Taguchi L16 yöntemi ile en yüksek en iyi denklemi kullanılmış ve S/N sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiş olup ikame malzemelerin S/N grafikleri Şekil 4.17., 4.18., ve 4.19.'da gösterilmiştir. En iyi karışım %5UK, %2,5P ve %0M oranları ile elde edileceği saptanmıştır.

Çizelge 4.12. 28 Günlük Basınç S/N Oranları

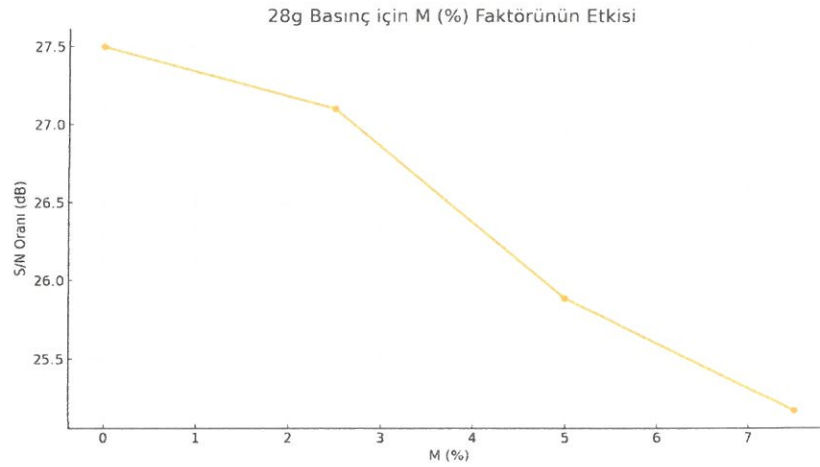
28 günlük Basınç S/N			
Seviye	UK (%)	P (%)	M (%)
0	26,47	26,81	27,5
2,5	25,56	26,84	27,1
5	27,2	25,99	25,89
7,5	26,43	26,02	25,17



Şekil 4.17. Puzolanın 28 Günlük Basınç S/N Oranına Etkisi



Şekil 4.18. Uçucu Külün 28 Günlük Basınç S/N Oranına Etkisi

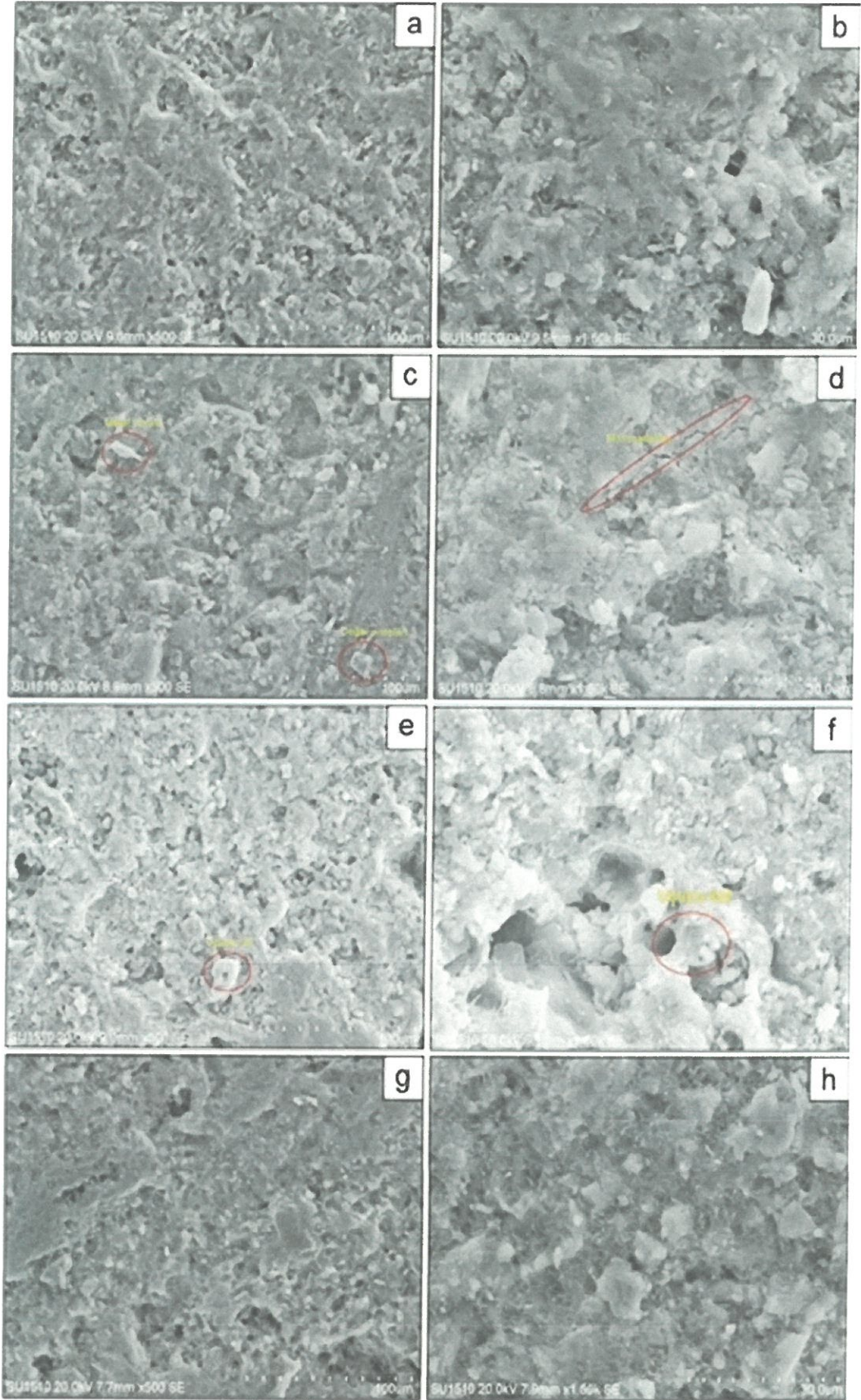


Şekil 4.19. Metal Cürufun 28 Günlük Basınç S/N Oranına Etkisi

4.6. SEM Analiz Sonuçları

Hazırlanan nihai karışımlardan (REF), (K7,5P7,5M), (K7,5UK7,5M) ve (K7,5UK7,5P) enjeksiyon şerbetlerinin iç yapısında meydana gelen mikro değişimleri gözlemek için SEM (taramalı elektron mikroskobu) analiz yapılmış ve meydana gelen değişim ve sonuçlar Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Herhangi bir ikame içermeyen referans karışımının SEM görüntüleri incelendiğinde oluşan hidrasyon ürünleri ile birlikte yoğun bir mikro yapıya sahip olduğu görülmektedir. Metal cürufu ve doğal puzolandan meydana gelmiş K7,5P7,5M karışımın görüntülerinde reaksiyona girmemiş parçacıkların olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda mikro çatlakların yer aldığı görüntüde, boşluk oranının referans numuneye göre biraz daha fazla olduğu tespit edilmiştir. UK ve M içeren K7,5UK7,5M şerbet karışımının görüntüleri ile doğal puzolan ve metal cürufu içeren pasta görüntüleri arasında önemli farklar tespit edilmemiştir. Benzer şekilde referans karışımına göre daha fazla boşluk olduğu belirlenmiştir. UK ve doğal puzolan içeren K7,5UK7,5P karışımın ise cüruf içeren numenlere göre daha yoğun bir mikro yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.20. Nihai Karışımların REF (a-b) , K7,5P7,5M (c-d), K7,5UK7,5M (e-f), K7,5UK7,5P (g-h) SEM analiz görüntüleri

4.7. Beton Geçirimsizlik Deneyi Sonuçları

Nihai karışım numuneleri 72 saat 5 bar basınçlı su ile deneye tabi tutulduğunda Şekil 4.13'te gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Hazırlanan şerbet ince ve öğütülmüş malzemelerden oluştuğundan boşluk oranı düşüktür ve bu da geçirimsizlik için olumlu sonuçlar vermiştir.

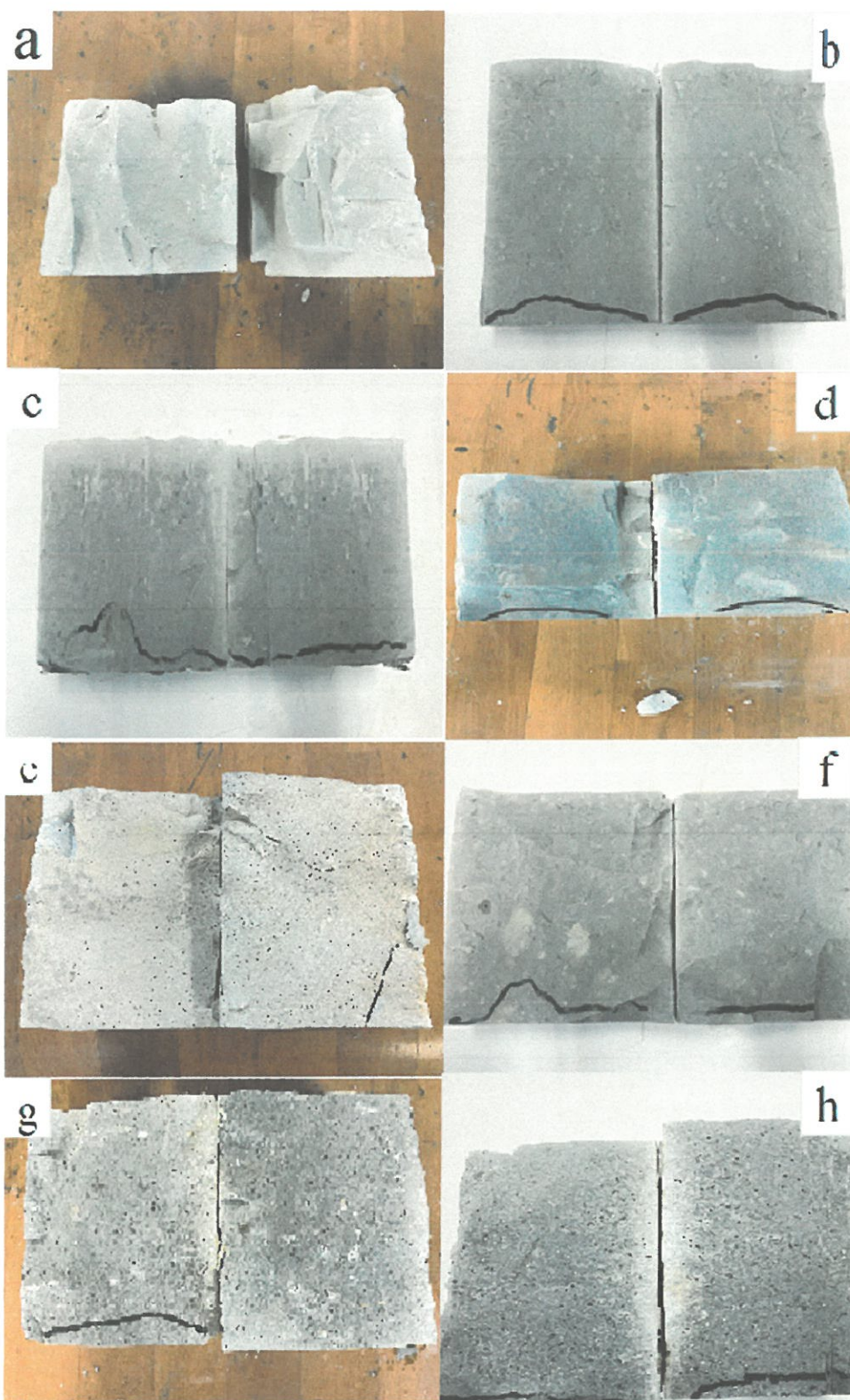
Yu Z. ve ark. (2018), uçucu kül ikameli çimento hamurunun gözenek parametrelerinin önceki çalışmalarda tartışılmalı olduğu, uçucu kül ikame edilmiş çimento hamurunun su geçirgenliğinin uçucu kül ikame edilmeyen çimento hamuruna göre 180 güne kadar olan sürede daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

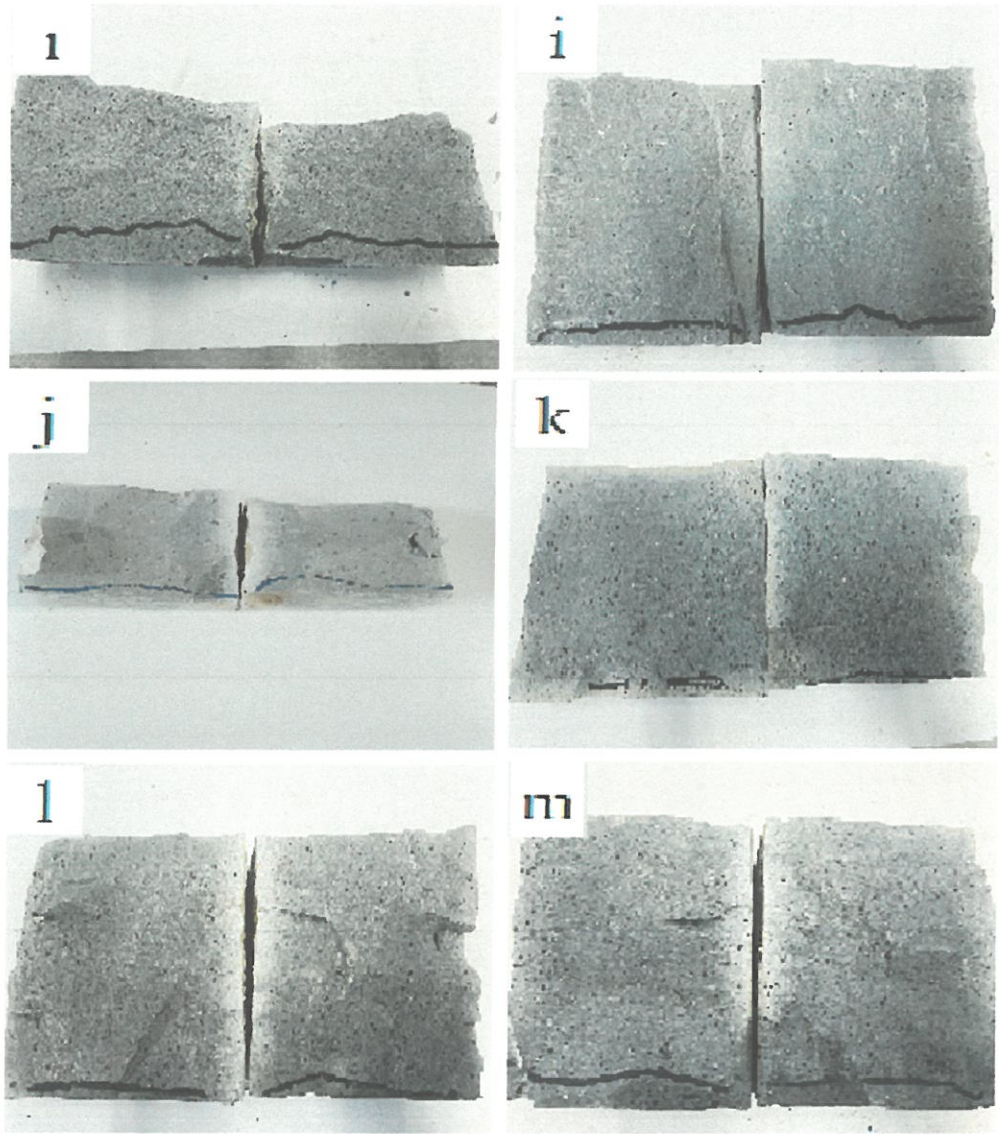
Liu Y. ve ark. (2019), metal cürufu ve uçucu kül içerikli çimento harcı ile geçirgen tuğla yapımı üzerinde çalışmışlar ve metal cürufu içeriğinin su geçirgenlik katsayısı üzerinde çok az etkisi olduğunu ve çelik cürufu içeriği yaklaşık %6 seviyesinde tutulduğunda su geçirgenlik özelliği sabit kaldığını tespit etmişlerdir. Uçucu kül içeriğinin ise geçirgenlik katsayısı üzerinde metal cürufuna kıyasla daha büyük bir etkisinin olduğunu belirlemişler. Uçucu kül ikame oranı arttıkça, gözenekliliğin arttığını ve su geçirgenliği daha da yüklediğini tespit etmişlerdir.

Yapılan geçirimsizlik deneyleri sonucunda ikame malzemelerin %5UK, %7,5P ve %2,5M oranları ile hazırlanan K5UK7,5P2,5M karışımı ile en iyi geçirimsizlik ve en yüksek ikame sonucunun aynı anda alındığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.13. Nihai Karışımların Geçirimsizlik Sonuçları

Karışım Numarası	Geçirimsizlik Seviyesi (cm)
REF	0
K2,5P2,5M	0
K5P5M	1,5
K7,5P7,5M	1,5
K2,5UK2,5M	0,5
K2,5UK2,5P	1,5
K2,5UK5P7,5M	1
K2,5UK7,5P5M	3,5
K5UK5M	1
K5UK2,5P7,5M	0,5
K5UK5P	1,5
K5UK7,5P2,5M	0
K7,5UK7,5M	1,5
K7,5UK2,5P5M	2
K7,5UK5P2,5M	2,5
K7,5UK7,5P	1,5





Şekil 4.21. Nihai Karışımların Geçirimsizlik Deneyleri REF (a), K5P5M (b), K2,5UK7,5P5M (c), K5UK5M (d), K5UK7,5P2,5M (e), K7,5UK5P2,5M (f), K7,5UK7,5P (g), K2,5UK5P7,5M (h), K7,5UK2,5P5M (i), K7,5P7,5M (i), K2,5UK2,5P (j), K5UK2,5P7,5M (k), K5UK5P (l), K7,5UK7,5M (m)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Hazırlanan enjeksiyon şerbetleri incelendiğinde sanayi atık malzemesi olarak kullanılan metal cürufunun çimento yerine ikame edilme oranı arttığında enjeksiyon şerbetlerinde çökeltme ve akışkanlığın arttırdığı basınç dayanımının ise azaldığı gözlenmiştir. UK ve doğal puzolan ise enjeksiyon şerbetlerinde çökeltme ve akışkanlık ve basınç dayanımını azaldığı belirlenmiştir.

DSİ enjeksiyon şartnamesinde enjeksiyon şerbetleri için istenilen 28 günlük basınç dayanımı 10 Mpa olduğundan hazırlanan bütün nihai enjeksiyon şerbeti karışımlarının basınç dayanımı sağladığı belirlenmiştir. En iyi basınç dayanımı çimento yerine %5UK ve %5 metal cürufu içeren K5UK5M şerbet karışımı ile %7,5 UK, %5 doğal puzolan ve %2,5 metal cürufu içeren K7,5UK5P2,5M şerbet karışımından elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise %7,5 UK ve %2,5 metal cürufu içeren K7,5UK7,5M şerbet karışımından alınmıştır. Taguchi L16 yöntemi en yüksek en iyidir formülü kullanılarak alınan sonuçlara göre enjeksiyon şerbetlerinde çimento yerine %5 UK ve %2,5P ikame ederek hazırlanacak enjeksiyon şerbetinin en iyi basınç dayanımı sonucunu vereceği tespit edilmiştir.

DSİ enjeksiyon şartnamesinde enjeksiyon şerbetleri için çökeltme deneyleri sonucunda istenilen çökeltme değeri %5'dir. Hazırlanan nihai enjeksiyon şerbeti karışımlarından en iyi basınç dayanımı sonucunu veren K5UK5M şerbet karışımının çökeltme deneyi sonucu %8 bulunmuştur. Çimento yerine %2,5 UK ve %2,5 doğal puzolan ikame edilerek hazırlanan K2,5UK2,5P enjeksiyon şerbeti karışımı %7 çökme değeri sonucu ile en düşük çökeltme sonucu elde edilmiştir. Taguchi L16 yöntemi en düşük en iyidir formülü kullanılarak alınan sonuçlara göre en iyi sonucun çimento yerine %2,5UK ve %2,5M oranlarında UK ve metal cürufu ikame edilmesiyle hazırlanan enjeksiyon şerbetinin vereceği belirlenmiştir.

Marsh hunisi deneyleri yapılırken baraj, gölet, tünel gibi su yapıları inşaatlarında uygulanan enjeksiyon işlemlerinde DSİ enjeksiyon ile ilgili yönetmeliklerinde deney süresinin 32 ile 35 saniye arasında sonuç vermesini istemektedir. Çimento yerine %2,5 UK ve %2,5 metal cürufu ikame ederek hazırlanan K2,5UK2,5M enjeksiyon şerbetinin 33 saniye ile en uygun sonucu verdiği belirlenmiştir. Ayrıca K5UK7,5P2,5M şerbet karışımının 34,27 saniye, K7,5UK5P2,5M karışımının 34,12 saniye ve K2,5UK2,5P

karişımının 34,27 saniyelik deney sonuçları ile istenilen süreler arasında sonuç verdiği tespit edilmiştir. TaguchiL16 yöntemi en düşük en iyidir formülü kullanılarak alınan sonuçlara göre imento yerine %2,5UK ve %2,5M kullanılarak hazırlanan enjeksiyon şerbeti karişımının en iyi akışkanlık sonucunu vereceği tespit edilmiştir.

Enjeksiyon için hazırlana şerbetlerin kıvamları incelendiğinde en fazla yayılma sonuçları K2,5UK7,5P5M ve K5UK5M karişımlarında elde edilmiştir. Karişım numunelerin hepsinin kıvam uygunluk değerlendirmesi sonucu çok akışkan ve düşük stabilite olarak belirlenmiştir. M, P ve UK malzemelerinin imento içeresinde ikame olarak kullanılması enjeksiyon şerbetlerinin yayılma miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Metal cürufu kullanımının, doğal puzolan ve uçucu kle göre, uçucu kül kullanımının da doğal puzolana göre daha fazla yayılma sağladığı tespit edilmiştir.

Hazırlanmış olan nihai enjeksiyon şerbetlerinin DSİ enjeksiyon şartnamesinde istenilen priz başlangıç ve priz sonu sürelerine göre incelendiğinde elde edilen priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin enjeksiyon şerbetinin kullanılması hakkında olumsuz bir sonuç oluşturmadığı tespit edilmiştir. UK, P ve M malzemelerin her biri imento yerine ikame edilmesiyle imento enjeksiyon şerbetinin priz başlangıcı sürelerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak, priz sonu sürelerinin sonuçları incelendiğinde UK ve P malzemelerinin priz sonu sürelerini uzattığı görülürken M'nin priz sonu süresini kısalttığı tespit edilmiştir.

Hazırlanan nihai karişım şerbetleri ince tlmş malzemeler ile elde edildiğinden geçirimsizlik deneyi sonuçları düşük çıkarken, bazı nihai karişım şerbetlerinde su geçirimsizliği gözlenmemiştir. Enjeksiyon şerbetleri hazırlanırken şerbetin geçirimsizliğini sağlamak için metal cürufu kullanımının puzolan kullanımından daha iyi sonuç verdiği, puzolan kullanımının da Uçucu kül kullanımından daha iyi sonuç verdiği saptanmıştır. Hem en iyi geçirimsizlik sonucu verecek hem de imento yerine en fazla ikame malzeme kullanılabilecek enjeksiyon şerbeti karişımının K5UK7,5P2,5M şerbet karişımın olduğu tespit edilmiştir.

Bütün etkenler kıyaslandığında optimumu sonuç olarak imento yerine %7,5 UK, %5 P, %2,5 M ikame eden K7,5UK5P2,5M enjeksiyon şerbeti karişımı çökelme deneyi sonucu %6 elde edilerek en iyi çökelme sonucunu vermiştir. Basınç deneyinde 26,37 Mpa basınç dayanımı sonucu alınarak yeterli basınç değerinde ulaşmış olup marsh hunisi deneyinde istenilen 35 saniye süreyi aşmama kriterini sağlamıştır. Bu sonuçlara göre imento yerine en iyi ikame edebilecek karişımın K7,5UK5P2,5M olduğu saptanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre UK, doğal puzolan ve metal cürufu kullanarak optimum nihai enjeksiyon karışımları ile elde edilen verilere göre çimento enjeksiyon şerbetlerinde çimento yerine %7,5 UK, %5 P, %2,5 M ikame edilerek toplamda %15 oranında ikame malzeme kullanılabileceği bundan dolayı çimentonun miktar olarak %85 oranına kadar düşürülebileceği tespit edilmiştir. Bu sayede çimento üretimi esnasında meydana gelen karbon salımın azaltılıp daha ekonomik şerbet karşımı elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Uçucu kül ve doğal puzolan düşük özgül ağırlığı ve çimento ile iyi etkileşimi sayesinde çimento enjeksiyon şerbetlerinde belli oranlarda çimento yerine ikame edilebilir. UK %5, %10 arası oranda tutulurken doğal puzolan ise %5 oranını geçmemelidir.

Metal cürufu yüksek özgül ağırlığında dolayı çökme meydan getirmektedir ve karışımlarda kullanılırken %5 oranını geçmemelidir. Şerbet yoğunluğunu düşürecek kimyasal katkı ile kullanılabilir ancak böyle bir karışım hazırlanırken kimyasal katkı ile cürufun ekonomik karşılaştırılması yapılmalı ve sonuca göre hareket edilmelidir.

Karışım harçlarının daha yüksek basınç dayanımına sahip olabilmesi için kullanılan ikame malzemelerin karışımlara eklenmeden önce daha ince tanecikli yapıya getirilmelidir.

Karışımlarda kullanılan metal cürufu ikame oranını arttırmak için bentonit su ile bentonit/su=1/10 oranında 24 saat karıştırılıp bekletildikten sonra enjeksiyon şerbetlerinde kullanılmalıdır. Bentonitin su ile uzun süre karıştırılması bentonitin daha fazla şişmesini sağlayacağından şerbet karışımlarında çökmeyi azaltacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, J., Tufail, R.F., Aslam, F., Mosavi, A., Alyousef, R., Faisal Javed, M., Zaid, O., Khan Niazi, M.S. A, 2021, Step towards sustainable self-compacting concrete by using partial substitution of wheat straw ash and bentonite clay Instead of Cement. Sustainability, 13(2), 824. <https://doi.org/10.3390/su13020824>
- Ahmet A.G.A., 2014, Fly Ash Utilization in Soil Stabilization, International Conference on Civil, Biological and Environmental Engineering, İstanbul
- Akcanca F., 2009 Katı atık depoları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında kum bentonit kireç karışımının kullanılabilirliğinin araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Aksoy, H. S., Yılmaz, M., & Akarsu, E. E., 2008, Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 6(3), 88-92
- Aruntaş H. Y. 2006, Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
- ASTM-D6910-D6910M-19, Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Construction Slurries.
- ASTM-C940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.
- Atabey V. Zemin laboratuvar deney raporları, <https://volkanatabey.com.tr/zemin-laboratuvari-deney-raporlari>
- Baba S., 2023, Baraj dolgu malzemesi iyileştirilmesinde uçucu kül ve mermer tozu kullanımı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon
- Banaszkiewicz, K., Marcinkowski, T., & Pasiecznik, I., 2022, Fly ash as an ingredient in the contaminated soil stabilization process, Energies, 15(2), 565. <https://doi.org/10.3390/en15020565>

- Bolin, Jiang Wu, Wu M., Zheng S., Shiyong H., 2023, A review on development of industrial solid waste in tunnel grouting materials, feasibility, Performance, and Prospects , DOI:10.3390/ma16216848, Basel
- Büyükoflaz M., 2023, Atık lastik parçalarının, kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kil zemin üzerindeki etkisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü
- Cai, X., Cao, Z., Sun, J., Wang, H., & Wu, S., 2024, Influence of steel slag on properties of cement-based materials: A Review. Buildings, 14(9), 2985. <https://doi.org/10.3390/buildings14092985>
- Chandrakanth M., N. S. P. C. Rao, 2016, Experimental studies on concrete with bentonite as mineral admixture,, GRD Journal for Engineering, vol. 1
- Cho W.J., Lee J.O., Chun K.S, 1999, The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite, Applied Clay Science, Volume 14, Issues 1–3
- Çavdar A. ve Yetgin Ş., 2010, Tras inceliğinin traslı çimento özelliklerine etkisi, KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
- Çelik K., 2005, Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve traşlı çimentolarda üretilen aynı mukavemet sınıfındaki harçların dayanım ve dayanıklılığının incelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Çelik M. H., Aruntaş Y. H., BARAN Y., 2003, Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin portland çimentosu-uçucu kül(PÇ-UK) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi, Gazi Üniversitesi, Yapı Eğitim Bölümü, Ankara
- Çuhali O., Türkel S., 2024, Kalsine Sodyum Bentonit Katkısının Harçların Geçirimsizliği Üzerine Etkileri, 11. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Ankara,
- Dehghanian K., 2021, Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül kullanarak iyileştirilmesi. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 66–72.
- Demir İ., Başpınar M., Görhan G., Kahraman E., 2008, Seyitömer uçucu külü ve Afyonkarahisar yöresi volkanik tüflerinin pozolanik özelliklerinin belirlenmesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitim Bölümü,
Afyon

- Demiröz, A., 2009, Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi, Cilt 8,Sayı:3-2009
- Dermatas D. ve Meng X. 2003, Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils, Engineering Geology 70(3-4):377-394 DOI:10.1016/S0013-7952(03)00105-4
- Dorum A., Tekin İ., 2003, Uçucu Kül ikameli çimento harcının basınç dayanımı ve priz zamanına distile su etkisinin araştırılması, Gazi Üniversitesi, Yapı Eğitim Bölümü, Ankara
- Erdoğan K., Tokyay M., Türker P., 2011, Traslar ve traşlı çimentolar, Türkiye çimento müteahhitleri birliği, Ankara
- Erdoğan Ş., 2011, Su geçirimsiz beton tasarımı ve örnek uygulamalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Fode T. A. , Jande Y. A. C. , Thomas K., 2024, Activated bentonite for physical, mechanical, and durability properties of concret, The Nelson Mandela African Institution of Science and Technology, Tanzania.
- Ghasemi A., Amiri S., Korayem A.H., Mirvalad S., 2022, Investigating the potential of trass-cement binary blend for enhancing microscopic properties, macroscopic performance, and sustainability of cement paste, Construction and Building Materials, Volume 354.
- Goswami, Mahanta, 2007, Leaching characteristics of residual lateritic soils stabilised with fly ash and lime for geotechnical applications, Waste Management, Volume 27, Issue 4.
- Guo W., Zou, S., Pu, S., & Zhou, Y., 2022, Study on the physical and chemical properties of cement-based grout containing coal-fly ash. materials, 15(24), 8804. <https://doi.org/10.3390/ma15248804>

- Günel, R. G., 1996, Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Horiuchi S. Kawaguchi M. Ve Yasuhara K., 2000, Effective use of fly ash slurry as fill material, Journal of Hazardous Materials Volume 76, Issues 2–3, Pages 301-337
- İncesu A., 2012, Düzenli depolama tesislerinde kullanılmak üzere kum-bentonit karışımlarının kireç ve yüksek fırın cürufu katkısı ile iyileştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- İTÜ TechnoBee, 2012, Elektrikli Ark Fırınılı Çelik Tesislerinde Üretilen Çelik Cürufunun Dolgu, Temel ve Alt Temel Olarak Kullanımına İlişkin Teknik Rapor Ek-A.
- Jalil A., Khitab A., Ishtiaq H. , Bukhari S. H. , Arshad M:T. , Anwar W., Evaluation of steel industrial slag as partial replacement of cement in concrete, Civil Engineering Journal Vol. 5, No. 1.
- Kavasoğlu B., 2022, Çelik cüruflarının alternatif kullanım alanlarının değerlendirilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Koçak Y., 2010, Tras ikame oranının portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin etkisi, e-Journal of New World Sciences Academy 2010, Volume: 5, Number: 3, Article Number: 1A0106, Düzce
- Laidani Z. E. A., B. Benabed, R. Abousnina, M. K. Gueddouda, E.-H., Kadri, 2020, Experimental investigation on effects of calcined bentonite on fresh, strength and durability properties of sustainable self-compacting concrete, Construction and Building Materials, vol. 230
- Yin L., Houlin L., Zeng M., Zhao Y., Ping He, Cheng J., Yan J., Han T., Chen H., Xu X., Wang J.W., Zhang L., Bui H. V., 2024, Extending the modified steel slag cement into the hydrophobic and anti-icing application, Materials Today Communications, Volume 38,

- Liban I. R. , 2022, Taguchi yöntemi ile uçucu kül ve kalker katkılı zeolit esaslı geopolimer harçların tasarlanması, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya
- Liu, Y., Tang, W., Singh, R. P., 2019, Study on Compressive strength and water permeability of steel slag-fly ash mixed permeable brick, *Applied Sciences*, 9(8), 1542. <https://doi.org/10.3390/app9081542>
- Mahvash S., Querol S., Jahromi A., 2017, Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization, Article Engineering Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London,
- Mengliang L., Yang H., Lai Z., Yan T., He X., Wu J., Zhongyuan L., Shuzhen L., 2020, Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 241,
- Mishra, A. K., Ohtsubo, M., Li, L., & Higashi, T., 2005, Effect of salt concentrations on the permeability and compressibility of soil-bentonite mixtures, Faculty of Agriculture, Kyushu University.
- Nayak D.K., Abhilash P.P, Singh R., Kumar R., Kumar V., 2022, Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies, *Cleaner Materials*, Volume 6,
- Nguyen D.T. ve Phan V.T.A., 2021, Engineering properties of soil stabilized with cement and fly ash for sustainable road construction, Faculty of Civil Engineering, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam
- Yusoff N, Ahmed Yusri Bin Muhammed, Nur Amirah Najihah Binti Şahminan, 2024, Steel slag: an eco-road construction material, <https://news.mypolycc.edu> , Malezya
- Oyak Maden, 2024, Faliyet Raporu
- Özyılmaz B. T. 2022, Bentonit kum karışımlarının geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kilis

- Paul S., Steven J., Aseel Mohammed, 2021, Decarbonizing cement production, joule, Volume 5, Issue 6, 1305 – 1311.
- Qiang W., Peiyu Y., Jianwei Y., Bo Z. 2013, Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete, Construction and Building Materials, cilt 47, sayfa 1414–1420, 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.044
- Salomao R. 2024, Effect of calcium and sodium-activated bentonites as waterproofing additives in polymer-modified cement mortar, Cerâmica 70 <https://doi.org/10.1590/WZHL2135>
- Savran, K. Z., 1988, Stabilization of Cohesive Soils With Fly Ash, ODTÜ, Y. Lisans Tezi, Ankara.
- Senhadji Y., Escadeillasa G., Khelafib H., Moulib M. and Benosman A.S., 2012, Evaluation of natural pozzolan for use as supplementary cementitious material. European Journal of Environmental and Civil Engineering Vol. 16, No. 1, January 2012, 77–96
- Shashank V., Revath V., 2017, Application of steel slag as an effective construction material in pavements, Civil Engineering Department, Malla Reddy Institute of Technology, Telangana, India, Volume 3, Issue 6.
- Solmaz P., 2008, Ayık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Spychał, E., & Vyšvařil, M., 2024, Physico-mechanical properties and hydration, processes of cement pastes modified with pumice, Trass and Waste Chalcedonite Powder. Materials, 17(1), 236. <https://doi.org/10.3390/ma17010236>
- Sun Y., 2005, Influence of steel slag powder on compressive strength and durability of concrete, Journal of Building Materials, 8(1):63-66
- Şenkaya, A., 2019, Farklı çimento tipleriyle oluşturulmuş jet grout kolonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ultra ses yöntemleriyle incelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya

- Şenol A., Tuncer B., Md.Sazzad Bin-Shafique, Hector A., Acosta, Craig H., Benson G., 2006, Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes, Resources, Conservation and Recycling, Volume 46, Issue 4,
- Şişman A. E., 2021, Sıkıştırılmış dolgularda enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, jeoteknik hizmetler daire başkanlığı, enjeksiyon şartnamesi 2025
- Tan Ö. , Gökhan G., Zaimoğlu A. Ş., 2007, Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonlarının daneli zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkileri, 2. Geoteknik Sempozyumu, Türkiye
- Tan Ö. Zaimoğlu A.Ş., 2023, Çimento Enjeksiyonlarında kullanılan katkı malzemelerinin reolojik özelliklere etkilerinin araştırılması, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Tokay, M. ve Erdoğan K. 1998, Türkiye’de üretilen uçucu küllerin karakterizasyonu, TÇMB/AR-GE/Y 98.2, ISBN, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara 1998, 70 s.
- Totîç ve E. 2019, Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi, DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2: 769-778
- Tozsın G., Yonar, F., Yucel, O., 2023, Utilization possibilities of steel slag as backfill material in coastal structures. Sci Rep 13,4318). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31156-z>
- TS EN 12390-8, Sertleşmiş beton deneyleri, Basınç altında su işleme derinliği tayini
- TS-EN-196-3, Çimento deney yöntemleri, priz süreleri ve genleşme tayini
- TS-EN-450-1, Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri
- Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2015, *Demir Çelik Cüruf Raporu*. TCÜD

- Türköz M., 2009, Sıkıştırılmış Şişen Killerin Mikroyapısal Değişimde Şişme-Büzülm Çevrimin Etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Eskişehir.
- Wang Z., Sun, Lv J., Kaihe; Xianbin H., Zhenhang Y., 2024, Mechanisms of low temperature thickening of different materials for deepwater water-based drilling fluids, gels; Basel Vol. 10, Iss. 12,789. DOI:10.3390/gels10120789, İsviçre
- Rui Y., Qian C., 2022, CO₂-fixing steel slag on hydration characteristics of cement-based materials, Construction and Building Materials, Volume 354,
- Yaprak H., Şimşek O., Aruntaş H. 2004, Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun süper akışkanlaştırıcı katkılı beton özelliklerine etkisi, Beton 2004 Kongresi, Türkiye,
- Yazıcı H., 2006, Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi, DEU Mühendislik Fakültesi, Fen Mühendislik Dergisi, Cilt:8 Sayı:1 s.51-58
- Yu, Z., Ni, C., Tang, M., & Shen, X., 2018, Relationship between water permeability and pore structure of portland cement paste blended with fly ash. Construction and Building Materials. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.147>
- Shi Z., Wang Q., Li X., Lei L., Qu L., Mao J., Zhang H. 2022, Utilization of super-hydrophobic steel slag in mortar to improve water repellency and corrosion resistance, Journal of Cleaner Production, Volume 341
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., 2008, Effective use of fly ash slurry as fill material, Journal of Hazardous Materials 47 , 509-523