



**ATIK TABAN KÜLLERİNİN
STABİLİZASYON/SOLİDİFİKASYON YÖNTEMİYLE
HARÇLARDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Gülbahar GÜNAY

Yüksek Lisans

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Elçin GÜNEŞ
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN**

2022

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK TABAN KÜLLERİNİN STABİLİZASYON/SOLİDİFİKASYON
YÖNTEMİYLE HARÇLARDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Gülbahar GÜNAY

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Elçin GÜNEŞ
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN

TEKİRDAĞ-2022

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans

ATIK TABAN KÜLLERİNİN STABİLİZASYON/SOLIDİFİKASYON YÖNTEMİYLE HARÇLARDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Gülbahar GÜNAY

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Elçin GÜNEŞ

Kömürün yanması sonucu uçucu kül, cüruf, taban külleri gibi çeşitli atıklar oluşmaktadır. Atık taban külleri (ATK), yakma kazanlarının diplerinde oluşan iri boyutlu katı kalıntıyı temsil etmektedir. Bu oluşan taban küllerinin depolanması sırasında yüksek alan ihtiyacı ve sızma ile çevreye verebileceği zararlar önemli çevresel problemlerdendir. Bu atıkların stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) yöntemi ile harç/beton üretiminde çimento veya kum ikamesi olarak kullanımı son yıllarda çalışılan önemli konulardandır. Çimento üretiminin çeşitli çevresel etkilerinin (sera gazları) ve maliyetinin yüksek olmasından dolayı çimento kullanımının azaltılması ve yerine ikame olabilecek malzemelerin belirlenmesi ve ayrıca kumun da doğal bir mineral olmasından dolayı kum kullanımının yerine ikame edilebilecek maddelerin değerlendirilmesi de çevresel açıdan önem teşkil etmektedir. Bu çalışma ile çimento ve kum kullanımının azaltılması, Trakya Bölgesi'nde oluşan ATK'lar için gerekli olan depolama alanlarının azaltılması ve S/S yöntemi ile ATK'ların belli oranlarda çimento ve kum ile yer değiştirerek harç/beton kullanımı gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilirliğinin sağlanması ile inşaat sektöründe ekonomik bir girdiye dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonuçlarında S/S yöntemi ile ATK'nın belli oranlarda çimento ve kum yerine kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Ayrıca üretilen harçların sızma testi ile oluşturacakları toksisite değerlerinin de maksimum değerleri aşmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Atık Taban Küllü, Stabilizasyon/Solidifikasyon, Harç, Çimento.

ABSTRACT

MSc./PhD Thesis

Usability of Waste Bottom Ashes in Mortars by Stabilization/Solidification Method

Gülbahar GNAY

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Elin GNEŐ

As a result of the combustion of coal, various wastes such as fly ash, slag, bottom ash are formed. Waste bottom ash (WBA) represents the coarse solid residue formed at the bottoms of the incinerators. During the storage of these formed bottom ash, the high space requirement and the damage it may cause to the environment by infiltration are important environmental problems. The use of these wastes as cement or sand substitutes in mortar/concrete production with the stabilization/solidification (S/S) method is one of the important subjects studied in recent years. Due to the various environmental effects (greenhouse gases) and cost of cement production, it is important to reduce the use of cement and to determine the materials that can replace it, and also to evaluate the materials that can be substituted for the use of sand, since sand is a natural mineral. With this study, it was aimed to reduce the use of cement and sand, to reduce the storage areas required for the WBAs formed in the Thrace Region, and to ensure that the WBAs can be used for various purposes such as the use of mortar/concrete by replacing certain proportions of cement and sand with the S/S method. . In the results of the study, it was revealed that S/S method and WBA can be used instead of cement and sand in certain proportions. In addition, it was observed that the toxicity values of the mortars produced by the leaching test did not exceed the maximum values.

Key words: Waste Bottom Ash, Stabilization/Solidification, Mortar, Cement

2022, 74 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
2.1. Stabilizasyon ve Solidifikasyon.....	5
2.2. Taban Külü Oluşumu, Özellikleri ve Kullanılabilirliği.....	6
2.3. Literatürde Yapılmış Çalışmalar.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal.....	14
3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ).....	14
3.1.2. Atık Taban Külü (ATK).....	15
3.1.3. Kum (SK).....	17
3.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi.....	17
3.1.5. Distile Su (S).....	18
3.2. Yöntem.....	18
3.2.1. Harç Numune Üretimi ve Numune Kürü.....	21
3.2.2. Yayılma Tablası Deneyi.....	22
3.2.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (V) Deneyi.....	23
3.2.4. Eğilmede Çekme Deneyi.....	24
3.2.5. Basma Deneyi.....	25
3.2.6. Sızma Testleri.....	26
3.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	30
4.1. DT1 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar.....	30
4.1.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT1).....	31

4.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT1).....	32
4.1.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT1).....	33
4.1.4. Basma Deney Sonuçları (DT1).....	34
4.1.5. ANOVA (DT1).....	35
4.2. DT2 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar.....	38
4.2.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT2).....	39
4.2.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT2).....	39
4.2.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT2).....	40
4.2.4. Basma Deney Sonuçları (DT2).....	41
4.2.5. ANOVA (DT2).....	43
4.3. DT3 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar.....	45
4.3.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT3).....	47
4.3.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT3).....	48
4.3.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT3).....	48
4.3.4. Basma Deney Sonuçları (DT3).....	50
4.3.5. ANOVA (DT3).....	51
4.4. Sızma Testi Sonuçları.....	54
4.5. SEM Analizi.....	54
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	66

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çimento ve taban külü kimyasal analiz sonuçları.....	14
Çizelge 3.2. Çimento ve taban külünün fiziksel özellikleri.....	15
Çizelge 3.3. ATK'nın 28 günlük dayanım aktivite indeksi.....	16
Çizelge 3.4. DT1'de üretilen harçlar için gerekli malzeme miktarları ve numune kodlamaları	19
Çizelge 3.5. DT2 için üretilen harç numunelerde kullanılan malzeme bileşim miktarları ve numune kodlamaları	20
Çizelge 3.6. DT3 için üretilen harç numunelerde kullanılan malzeme bileşim miktarları ve numune kodlamaları	20
Çizelge 3.7. Kullanılan atık taban külünün "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" Ek-2 kapsamında eluat testi değerleri.....	27
Çizelge 3.8. (devam) Kullanılan atık taban külünün "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" Ek-2 kapsamında eluat testi değerleri.....	28
Çizelge 4.1. Deneme noktaları (DT1)	30
Çizelge 4.2.(devamı) Deneme noktaları (DT1).....	31
Çizelge 4.3. Yayılma değerleri (DT1).....	31
Çizelge 4.4. V'ye ait ANOVA (DT1)	35
Çizelge 4.5. f_f' 'e ait ANOVA (DT1)	36
Çizelge 4.6. f_c' 'ye ait ANOVA (DT1).....	36
Çizelge 4.7 Uyum istatistiği (DT1)	37
Çizelge 4.8. Deneme noktaları (DT2)	38
Çizelge 4.9. Yayılma değerleri (DT2).....	39
Çizelge 4.10. V'ye ait ANOVA (DT2)	43
Çizelge 4.11. f_f' 'e ait ANOVA (DT2).....	43
Çizelge 4.12. f_c' 'ye ait ANOVA (DT2).....	44
Çizelge 4.13. Uyum istatistiği (DT2)	45
Çizelge 4.14. Deneme noktaları (DT3)	46
Çizelge 4.15. Yayılma değerleri (DT3).....	47
Çizelge 4.16. V'ye ait ANOVA (DT3)	51
Çizelge 4.17. f_f' 'e ait ANOVA (DT3)	52
Çizelge 4.18. f_c' 'ye ait ANOVA (DT3).....	52
Çizelge 4.19. Uyum istatistiği (DT3)	53
Çizelge 4.20. SEM analizi numune kodlaması.....	54

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 3.1. Çimento (A) ve atık taban külü (B) SEM görüntüleri.....	15
Şekil 3.2. 75 µm (a) ve (b) elek altı taban külü elek altı taban külü.....	17
Şekil 3.3. 2 mm elek altı atık taban külü ve CEN standart kuma ait granülometri eğrileri.....	17
Şekil 3.4. Distile su üretim cihazı.....	18
Şekil 3.5. Harç numune kalıpları (a) ve hassas terazi (b).....	21
Şekil 3.6. Harç numune üretimi ve numune kürü.....	22
Şekil 3.7. Yayılma tablası deneyi	23
Şekil 3.8. UPV deney düzeneği	24
Şekil 3.9. Eğilmede çekme deneyi	25
Şekil 3.10. f_c deney düzeneği	26
Şekil 3.11. SEM cihazı	29
Şekil 4.1. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1).....	32
Şekil 4.2. f_f 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1)	33
Şekil 4.3. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1)	34
Şekil 4.4. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2).....	40
Şekil 4.5. f_f 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2).....	41
Şekil 4.6. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2)	42
Şekil 4.7. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3).....	48
Şekil 4.8. f_f 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3).....	49
Şekil 4.9. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3)	50
Şekil 4.10. Referans numuneye ait SEM görüntüsü (DT1, DT2 ve DT3)	55
Şekil 4.11. ATK-PC%25 numunesine ait SEM görüntüsü (DT1).....	55
Şekil 4.12. ATK-SK%15 (a) ve ATK-SK%25 (b) numunelerine ait SEM görüntüleri (DT2)	56
Şekil 4.13. ATK-SK%15k (a) ve ATK-SK%25k (b) numunelerine ait SEM görüntüleri (DT3)	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

ACAA	: American Coal Ash Association
ACAS	: Airborne Collision Avoidance System
ATK	: Atık Taban Külü
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO ₂	: Karbondioksit
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EPA	: Environmental Protection Agency
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
MgO	: Magnezyum Oksit
mm	: Milimetre
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
PCB	: Poliklorlu bifeniller
PÇ	: Portland Çimentosu
PNS	: Polinaftalin Sülfonat
PNS	: Polinaftalin Sülfonat
S/S	: Stabilizasyon/solidifikasyon
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SO ₃	: Sülfat
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TK	: Taban Külü
TK	: Taban Külü
UK	: Uçucu Kül
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamda daha iyisini yapmam için beni teşvik eden, tez konumun belirlenmesinde ve deneysel aşamalarında yön gösteren değerli danışmanlarım Prof. Dr. Elçin GÜNEŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN'a destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Tezimin deneysel çalışmalarımın yürütülmesinde her zaman yanımda olup desteğini ve sabrını esirgemeyen Selen YILDIZ'a teşekkür ederim.

Manevi destekleriyle her zaman bana güç veren annem Şükran GÜNAY ve ablam Hülya GÜNAY'a teşekkür ederim.

Ocak, 2022

Gülbahar GÜNAY
Çevre Mühendisi

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

Dünyada enerji santrallerinde ve endüstrilerdeki fırınlarda/kazanlarda ısı eldesi için kömür kullanımı oldukça yaygındır. 2020'de dünyanın en büyük iki kömür kullanan ülkesi, aynı zamanda dünyanın en kalabalık iki ülkesi olan Çin ve Hindistan olmuştur. Dünya kömür tüketiminin %54,3'ünü Çin ve %11,6'sını Hindistan gerçekleştirmiştir. (Sönnichsen, 2021) Türkiye'de elektrik/enerji üretimi için doğal gaz, fuel oil, yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal vb.), gibi alternatifler yanında kömür de yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinin (TEİAŞ) verilerine göre 2020 yılında elektrik üretiminde linyit-taş kömürü-asfaltit kullanımı % 15 ve ithal kömür kullanımı % 21,3 olmuştur (TEİAŞ, 2020).

Enerji ve ısı elde etmek için kömür kullanımı tüm dünyada yaygın olmasına rağmen çevreye zararlı birçok etkisi bulunmaktadır. Bu etkilerden en önemlisi kömür kullanımından kaynaklanan uçucu kül, cüruf, taban külü vb. atıklardır. Bu atıkların kullanımı ile oluşan bu atıkların bertaraf sorunu oldukça önemli bir çevre sorunudur. Bu atıkların bertarafı düzenli depolama sahalarına gömülerek yapılmakta ve bu durumda büyük alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında bu atıkların depolanması ile sızma sonucu birçok kirleticinin yeraltı sularına karışması bir başka önemli çevre sorunudur. Gittikçe artan sanayileşme, kentleşme ve buna bağlı olarak nüfus artışı ile bu atık miktarları daima artma eğilimindedir. Artan atık miktarı nedeniyle karşılaşılan zorluklar, atıkların azaltılmasını ve oluşan atıkların başka bir endüstriyel üretimde hammadde olarak kullanılmasını amaçlayan yaklaşımlar gerektirmektedir. Kömürün yanması ile oluşan bu tip atıkların çeşitli amaçlarla kullanımı üzerinde uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle son yıllarda, birçok çalışma, düşük maliyeti, düşük yoğunluklu dolgusu ve aynı zamanda çimento ve kum gibi inşaat malzemelerinin yerine kullanılmaya uygunluğu nedeniyle kömür taban küllerinin harç/beton yapımında çimento veya kum ikamesi olarak, baraj bentleri, otoyollar ve diğer inşaat projeleri gibi çeşitli amaçlarla kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır (Ramzi, Shahidan, Maarof ve Ali, 2016). Üretim yan ürünleri olarak da bilinen bu küller, çimentoya sürdürülebilir alternatifler olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır (Klangvijit ve Sookramoon, 2018). Çimento üretim aşamasında büyük miktarlarda sera gazı (CO₂) üretimi gerçekleşmektedir. Çimento endüstrisi, toplam küresel CO₂ emisyonlarının %5'ine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle

taban külleri gibi atıkların çimento yerine beton/harç yapımında kullanılabilirliğinin araştırılması oldukça önemli bir konudur.

Taban külü kömürle çalışan kazanlarda ve/veya termik santrallerde yanma sırasında, kazanın altında biriken farklı boyutlardaki atık ve/veya yan üründür (Konak, 2018). Türkiye’de de taban küllerinin bertarafı genellikle düzenli depolama tesislerinde yapılmaktadır. Bu depolama tesisleri taban külünün gömülmesi amacıyla kullanıldığında oldukça fazla alana ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle depolama amaçlı kullanılacak arazi miktarının azaltılması ve çevresel etkilerin minimize edilebilmesi için taban külü atıklarının farklı üretimlerin hammaddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması önem kazanmaktadır. Ayrıca taban küllerinin bertaraf maliyetine ek olarak deponi sahasına taşınması da ayrı bir maliyet gerektirmektedir. Bu nedenlerle taban küllerinin depolanması yerine stabilizasyon/solidifikasyon prosesi ile katılaştırılarak ikincil hammadde olarak kullanılması hem doğal kaynakların tüketiminin azaltılması hem de çevresel tahribatın en aza indirilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir.

Stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) prosesi aynı zamanda kimyasal sabitleme olarak da adlandırılmaktadır. Bu prosesin amacı zararlı veya zararlılık potansiyeli olan atıkların çevreye en az etki yaratacak forma dönüştürmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılarak stabil forma getirilmesidir. S/S prosesi çimento benzeri bağlayıcılık özellikleri bulunan katkı malzemeleri kullanılarak, atıkları formlarını sabitleyerek, tehlikelilik oranlarını düşüren bir tekniktir. Bu yöntemde solidifikasyon ile atıkların katı formda olduğu için atık bünyesindeki kirleticiler sabitlenir, sonuçta atığın tehlikeli özellikleri ortadan kaldırılmış, tehlikeli maddelerin sızması engellenerek çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması sağlanır (Oproiu, Voicu, Badanoiu ve Nicoara, 2021).

Atık malzemelerin beton/harçlarda mineral katkı maddesi olarak kullanımı atıkların depolanması ile oluşabilecek çevresel etkilerinin en aza indirgenmesi açısından oldukça önemlidir. Tüm bu atıklar/yan ürünler, çevreye salındıkları zaman doğal riskler oluşturan ve depolanmaları ve/veya bertaraf edilmeleri ise alan ihtiyacı nedeniyle ekonomik olarak da kayıplara neden olan atıklardır (Koçak, 2011). Atıkların çimento veya önemli bir mineral kaynak olan kum yerine kullanımı bu nedenlerden dolayı oldukça önemlidir. Kömürün yanması sonucu ortaya çıkan taban külleri bu amaçla kullanılabilir ürünlerden birisidir. Taban külü ince ve küresel yapısı dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi arttırmaktadır; ayrıca hidrasyon ısını azaltmaktadır. Taban külleri ayrıca çimento hidrasyonu ile oluşan kireçle

tepkimeye girerek e bağlayıcı jel oluşturmakta, çimento hamurundaki gözenekleri doldurarak betona mukavemet kazandırmaktadır (Konak, 2018).

Bu çalışmada Trakya bölgesinde bulunan iplik boyama, elektrik, buhar, sıcak su üretimi, kağıt ürünleri ve kağıt hammaddeleri imal eden bir tesisin yakma kazanlarından alınan ve bir atık depolama sahasında bertaraf edilen atık taban küllerinin, beton/harç üretiminde çimento ve ince agreganın (kum) yerine belirli oranlarda ikame edilmesi ile inşaat sektöründe kullanılabilirliği ve ekonomik bir girdiye dönüştürülme potansiyeli araştırılmıştır.

1.2. Amaç ve Kapsam

Beton ve harç üretimindeki ana bileşenler çimento, kum, su ve agregadır. Yukarıda da açıklandığı üzere çimentonun üretimi sonrası çevreye oldukça yüksek miktarlarda sera gazları (en önemlisi CO₂) salınmaktadır. Ayrıca yine harç üretiminde kullanılan kum önemli bir mineral kaynaktır. Bundan dolayı harç üretiminde çimento ve kumun yerini alabilecek malzemelerin kullanımı hem önemli bir mineral kaynak olan kumun kullanımını azaltabilmekte hem de çimento üretiminden kaynaklanan sera gazlarının emisyonunu azaltmaktadır. Ayrıca ATK için geniş depolama alanları gerekmekte ve depolandıkları yerlerde sızma ile çeşitli çevresel sorunlara neden olma potansiyeline sahip olabilmektedirler.

Bu çalışma, iplik boyama, elektrik, buhar, sıcak su üretimi, kağıt ürünleri ve kağıt hammaddeleri imal eden bir tesisin yakma kazanlarından alınan ve Çorlu'da III.sınıf bir düzenli depolama sahasına gömülen ATK'nın farklı oranlarda çimento ve kum ile değiştirilerek S/S yöntemleri ile harç üretilmesi esasına dayandırılmıştır. Çalışmada atık taban küllerinin bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R çimentosu ile farklı oranlarda karıştırılarak sabitlenmesiyle oluşan harçların işlenilebilirliği, ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri, basınç ve eğilmede çekme deneyleri yapılarak harçlarda/betonda kullanılabilirliği ölçülmüştür. Çalışmanın amacı, ATK'nın harç üretiminde hangi oranlarda çimento ve kum yerine kullanılabileceğini belirlemek, S/S yöntemi ile taban küllerinin depolamaya ihtiyaç duymadan kullanımını sağlamak (depolama için gerekli alan ihtiyacını azaltmak) ve ayrıca depolama sonrası sızma ile çevreye olası etkilerini en aza indirmeye çalışmaktır.

Çalışmada ilk olarak S/S prosesi özetlenmiş, kömür kullanımı ile oluşan atıkların (uçucu küller, taban külleri vb.) literatürde kullanım alternatifleri değerlendirilmiş ve taban küllerinin harç/betonlarda kullanılabilirliği üzerine dünyada ve Türkiye’de yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

Çalışmada daha sonra Trakya’da oluşan ve Çorlu’da bir düzenli depolama sahasında bertaraf edilen atık taban küllerinin harç üretiminde çimento ve kum ikamesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi için kullanılan materyal-metot detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümde taban küllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan taban külünün kimyasal bileşimi, tane biçim özellikleri ve dayanım aktivite indeksi belirlenmiş, CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile karşılaştırma yapılarak taban küllerinin harç/betondaki potansiyel uygulamaları için uygunluğu değerlendirilmiştir.

Atık taban küllerinin S/S yöntemi kullanılarak üretilen harçların işlenbilirliği, ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri, basınç ve eğilmede çekme deneyleri yapılarak dayanımları belirlenmiş ve bu atıkların bu amaçla kullanılabilme potansiyelleri değerlendirilmiştir. Atık taban külleri kullanılarak üretilen harçların sızma deneyleri yapılarak zararlılık potansiyelleri de belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Stabilizasyon ve Solidifikasyon

Stabilizasyon ve solidifikasyon (S/S) teknikleri, atıkların depolama sahalarında bertarafından kaynaklanabilecek tehlikeli maddelerin sızma potansiyelini azaltmak için tehlikeli veya toksik maddeleri hareketsiz hale getiren etkili ön arıtma yöntemleri olarak bilinir (Hashemi, Mahmud, Ghuan, Chin, 2019). S/S, çeşitli atıkların yönetimi/bertaraf edilmesi için verimli, ekonomik olarak uygulanabilir ve yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu yöntem, atıkların kireç, çimento, alçı, cüruf, uçucu kül veya fosfat çimentoları gibi bağlayıcı maddelerle karıştırılması esasına dayanır (Oproiu vd., 2021). Aşağıda solidifikasyon ve stabilizasyon yöntemi kısaca açıklanmaktadır:

Solidifikasyon: Atıkların mobilizasyonunu azaltmak için, ilgili atığı bağlayacak doğal veya yapay bir maddenin (örneğin Portland çimentosu) kullanıldığı bir tekniktir (Sengupta, 2007). Genel olarak 2 mm veya daha az incelikte olan atık parçacıklarına uygulanan solidifikasyona mikrokapsülleme, büyük bir atık bloğuna veya konteynerine uygulanan solidifikasyona ise makroenkapsülasyon denir (Sengupta, 2007).

Stabilizasyon: Bu proseste bir bağlayıcı ile tehlikeli atık arasında atığı daha az zararlı hale getirmek için kimyasal bir reaksiyon başlatılır (Sengupta, 2007). Atıkların çimento esaslı malzemelerle karıştırılarak katılaştırılması, reaksiyonun pH'ından dolayı çeşitli kirleticilerin özellikle ağır metal iyonlarının hareketliliğini azaltmaktadır. Bu yararının yanında aynı zamanda inşaat endüstrisinde kullanılabilen basit ve uygun maliyetli bir yöntemdir (Hashemi vd., 2019).

S/S, inorganik bağlayıcılar (Portland çimentosu, kireç, kireç fırın tozu, uçucu kül, cüruf vb.) ve organik bağlayıcılar (asfalt, termoplastik ve üreaformaldehit) gibi farklı türde bağlayıcıların karıştırılmasını içerir. Ticari ölçekli S/S'nin çoğu, organik bağlayıcıların getirdiği maliyet kısıtlamaları nedeniyle inorganik bağlayıcıların kullanımını içerir. Farklı S/S projeleri, farklı türde karışım tasarımları gerektirir. Bu, atıklardaki ve konsantrasyonlarındaki büyük farklılıklar nedeniyle gereklidir (Sengupta, 2007).

Portland çimentosu ile S/S bazen kirletici içindeki toksisite seviyelerini düşürme yeteneğine sahiptir. Portland çimentosu bazlı karışım tasarımları, popüler S/S metotlarından biri olmuştur ve diğer herhangi bir S/S bağlayıcı reaktiften çok daha çeşitli atıklara

uygulanmıştır. Portland Cement Association'a göre, reaktifin aşağıdaki gibi özellikleri bulunmaktadır (Sengupta, 2007):

- (1) Serbest sıvıları kimyasal olarak bağlama,
- (2) Atık formunun geçirgenliğini azaltma,
- (3) Atık parçacıklarının çevresini geçirimsiz bir tabaka ile kaplama,
- (4) Çözünürlüğü azaltarak tehlikeli bileşenleri kimyasal olarak sabitleme,
- (5) Bazı kirleticilerin toksisitesinin azaltılmasını kolaylaştırma.

S/S prosesi çimento suyla reaksiyona girdiğinde meydana gelen çeşitli fiziksel ve kimyasal değişiklikler nedeniyle gerçekleşir. Portland çimentosu su ile karıştırıldığında hidrasyona uğrar ve kirleticilerle fiziksel bağlar oluşturur. Bu fiziksel bağlar, kirleticileri bir matrise hapseder ve sonunda onları daha az hareketli hale getirir. Bu tür teknikler ayrıca işlenen malzemenin geçirgenliğini azaltabilme ve sızıntıyı önemli ölçüde azaltabilme potansiyeline sahiptir. Çimentonun su ile teması halinde hidrasyonu, su ve kirleticilerle daha fazla reaksiyona giren kalsiyum hidroksit $Ca(OH)_2$ üretilir, bu da onları biraz daha az çözünür ve dolayısıyla daha az sızabilir hale getirir. Hidrasyon üzerine Portland çimentosu ayrıca kirletici maddelere bağlanma eğiliminde olan ve onları daha az çözünür hale getiren karbonat ve silikat bileşikler oluşturur (Sengupta, 2007).

Poliklorlu bifeniller (PCB), uçucu organik bileşikler (VOC), halojenli ve halojenli olmayan yarı uçucu maddeler gibi çeşitli organik bileşikler ve çeşitli ağır metaller S/S uygulaması ile katılaştırılarak daha az zararlı formlara dönüştürülebilmektedirler. Serbest suyun bağlanması, monolit oluşumu, atığın hidrolik iletkenliğinde düşüş, organik atıkların artıldığı mekanizmalardan bazılarıdır. Yüksek konsantrasyonlarda yağ ve gres bazen çimento partikülleri üzerinde bir tabaka oluşturarak su ilavesiyle hidrasyonu önleyebilmektedir. Bazı hidrasyon reaksiyonu ekzotermik olarak gerçekleşebilir; açığa çıkan ısı, toprakta bulunan belirli VOC'leri uçurabilmektedir (Sengupta, 2007).

2.2. Taban Külü Oluşumu, Özellikleri ve Kullanılabilirliği

Kömür, karbon ve çeşitli mineral karışımlarından oluşan fosil kaynaklı bir enerji kaynağıdır. Kömür birçok endüstriyel alanda yakılarak enerji üretimi için kullanılmaktadır. Kömür yanmasından kaynaklı atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri; yakılma tekniğine ve kömürün çeşidine göre farklılık gösterir. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) kayıtları

çerçevesinde ülkemizin 2018 yılı toplam satılabilir kömür üretimi 83,93 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (EİGM, 2018). Kömür yanması sonucu ortalama; %57 uçucu kül, %24 oranında baca gazı kükürt giderme malzemesi, %17 oranında taban külü ve <2 kazan cürufu oluşmaktadır (Luther, 2010). Yüksek miktarlarda oluşan kömür yakma atıklarının çevreye kontrolsüz şekilde bırakılması çevre ve insan sağlığı için büyük risk oluşturmaktadır. Taban külleri ve uçucu küller depolama alanlarına depolandığında; çeşitli kirleticilerin suya, toprağa ve havaya karışma olasılığı yüksektir. Ayrıca bu atıkların depolama sahalarında kapladıkları alan ihtiyacı oldukça yüksek olabilmektedir. Bundan dolayı kömür küllerinin depolanması yerine yeniden kullanımı konusunda dünyada ve Türkiye’de çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Çimento üretimi enerji yoğun sektörlerden biridir ve buna bağlı olarak sera gazlarının salınımında önemli rol oynayan bir sektördür (Kaya, 2010). Çimento üretimi endüstrisinin en önemli ve olumsuz etkisi CO₂ oluşumudur. CO₂ emisyonu oluşumu ise klinker üretilirken kullanılan hammaddelerden ve fosil yakıtlardan kaynaklanmaktadır. Çimento endüstrisi, dünyada toplam CO₂ salınımının neredeyse %7’sinin kaynağıdır (ACAS, 2016; EPA, 2018). Bu salınımı azaltabilmenin başlıca yöntemlerinden birisi çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılabilirlik özelliklerinden faydalanılarak, çimentoya belli oranlarda puzolanik özellik gösterebilecek katkı maddeleri eklemektir. İkame edilen katkı maddeleri klinker/çimento oranını azaltarak CO₂ salınımını düşürebilmekte ve böylece daha sürdürülebilir çimento üretim süreci sağlanabilmektedir.

Atık taban külleri (ATK), elektrik enerjisi için kömür kullanımı sürecinden kalan katı kalıntı, ve yanma kazanının dibine düşen iri boyutlu fraksiyonu temsil etmektedir. ATK endüstriyel katkı maddelerinden biridir. ATK’ların özellikleri kömür tipi, yakma teknolojisi ve fırın tipine bağlıdır (Kaya, 2010). Beton üretiminde mineral katkı kullanımı birçok teknik özelliği olumlu yönde geliştirmesi, Portland çimentosundan daha ekonomik olmaları ve beton karışımlarında çimento oranının %50’si oranlarına kadar kullanılabilmeleri sebebiyle oldukça önemlidir. En yaygın kullanılan mineral katkılar; uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, taban külü ve mermer tozudur. Bu mineral katkıların çimento katkı malzemesi olarak kullanılabilmesinin başlıca şartı fiziksel olarak çimento boyutuna getirilene kadar öğütülmesidir. Birçok çalışmada kömür küllerinin düşük özgül ağırlık, düşük sıkıştırılabilirlik, yüksek konsolidasyon oranı, yüksek mukavemet, yüksek hacim kararlılığı ve puzolanik aktivite gibi avantajlı özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir (Prakash ve Sridharan, 2009).

Taban külleri, yüksek gözenekli bir yüzeye, büyük parçacık boyutuna, köşeli şekle ve camsı bir dokuya sahiptir. Taban küllerinin boyutu ince çakıldan ince kuma kadar değişkenlik göstermektedir. Taban külü partiküllerinin boyutu 50,8 mm ile 0,075 mm arasında değişmektedir (Kaya, 2010). Taban küllerinin içeriğinde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , SO_3 gibi maddeler bulunmaktadır (Singh ve Siddique, 2013; Bhatt ve vd., 2019; Mohammed vd., 2021). Çeşitli çalışmalarda elde edilen bilgilere göre kullanılan kömür tipine bağlı olarak, SiO_2 % 45-69, Al_2O_3 %16-19, Fe_2O_3 %6-19, CaO %1-9.5, MgO %0.35-2.45, Na_2O %0.08-2.43, K_2O %0.33-5.3, TiO_2 %0.84-3.27, P_2O_5 %0.01-1, ve SO_3 %0.01-1.39 aralıklarında ölçülmüştür (Singh ve Siddique, 2013; Mohammed vd., 2021). Taban küllerinin spesifik yoğunluğu çeşitli çalışmalarda 1.47-2.78 arasında değişmiştir (Prakash ve Sridharan, 2009). Yanma kaybı (950°C) ise çeşitli çalışmalarda 0.61-12.8 arasında rapor edilmiştir (Singh ve Siddique, 2013; Prakash ve Sridharan, 2009).

Almanya'da oluşan taban küllerinin %50'si otoyollarda dolgu duvarlarında ve yolların alt dolgularında yeniden kullanılmaktadır. Benzer şekilde, Hollanda'da kömür taban külünün yaklaşık %60'ı asfalt yapısında ve yolların alt katmanında kullanılmaktadır. Danimarka'da taban külünün %72'den fazlası park yerleri, bisiklet yolları ve diğer yollar için kullanılmaktadır (Reijnders, 2005). American Coal Ash Association'ın (ACAA) taban külü kullanımına ilişkin istatistiklerine göre, üretilen toplam taban külünün %45'inden fazlası tekrar kullanılmaktadır. Kullanım alanları; temel olarak yapısal dolgu, yol malzemesi gibi ulaşım uygulamaları, kar ve buz kontrol ürünleridir. Taban külü ayrıca hafif beton ünitelerinde agrega ve Portland çimentosu üretimi için hammadde olarak da kullanılmaktadır (ACAA, 2011).

2.3. Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Abdulmatin, Tangchirapat ve Jaturapitakkul (2018) yaptıkları çalışmada puzolonik malzeme olarak taban külünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada bu amaçla harç üretiminde ağırlıkça %20 oranında taban külü çimento ile ikame edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ASTM C618'de tanımlanan C ve F tipi uçucu kül özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Taban külünün puzolonik özelliğinin uçucu kül özelliğini sağlaması için kullanılması gereken taban külünün tane dağılımında ağırlıkça %75'nin 45µm'lik elek altına geçecek şekilde öğütülmesi gerektiği ortaya konmuştur. Partiküllerin 45µm'lik elekte ağırlıkça %5 oranında tutulduğu ve taban külü içeren harcın 28 gün sonra kontrol harcından daha iyi bir basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma için kullanılan taban külleri çeşitli

kaynaklardan elde edilmiş ve puzolanik bir malzeme olarak kullanılabilen kimyasal özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda ASTM C618'e göre uygun inceliğe sahip taban külünün puzolanik malzeme olarak kullanılabilenliği gösterilmiştir.

Köse, Akyıldız ve Yıldız (2013) çalışmalarında kömür taban külünü çimento ile ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranında yer değiştirerek beton/harç üretiminde kullanmıştır. Numunelerin beton kalitesine ait özelliklerini ve çevreye olan etkileri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada kömür külü oranı arttırıldıkça harç numunelerinin dayanımlarının, organik içeriği fazla olması nedeniyle düştüğü ve dayanımın kür süresiyle de yükseldiği belirlenmiştir. Çalışmada %20 çimento katkılı numune, 30 MPa basınç dayanımı seviyesine ulaşmıştır. Çalışma sonucunda çimento katkısı %20 oranına kadar kömür taban külü yerine Portland çimentosu ile S/S tekniğinin hem sızma hem de dayanıklılık boyutunda uygulanabileceği ve yapı malzemesi yerine de ikame edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Kayan, Ayhan ve Doğruyol (2017) çalışmalarında mineral katkıların beton karışımında kullanılmasını araştırmışlardır. Beton harcına ağırlıkça çimentonun %20'si oranında uçucu kül (UK) ve %10'u oranında silis dumanı (SD) gibi mineral katkı ikame edilmiştir. Numune olarak 15x15x15 cm ölçülerde beton hazırlanmıştır. Beton numuneleri %10 sülfat küründe 7, 28 ve 365 gün sonunda kırılmak üzere bekletilmiştir. Sonuç olarak su kürü ve sülfat çözeltisinde 7, 28 ve 365 gün kaldıktan sonra basınç dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek performansı, silis dumanı katkılı beton su küründe ve sülfat çözeltisi ile yapılan denemede göstermiştir. Uçucu kül ikameli beton en düşük dayanımı erken yaşta göstermiştir. Ancak 28 günlük mineral katkısız betonun dayanım değerine yaklaşmış ve mineral katkısız betonun 365 gün sonra ileri yaş dayanım değerinden yüksek çıkmıştır.

Bhatt vd. (2019) yaptıkları çalışmada uçucu küllerin yeniden kullanım özelliklerini etkileyen fiziksel, kimyasal ve jeoteknik özelliklerine ilişkin mevcut literatürü özetlemişlerdir. Uçucu küller, endüstriyel uygulamaları için dünya çapında, çoğunlukla çimento endüstrilerinde kullanılmıştır. Çimento endüstrisi genel olarak C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere iki kimyasal tipte sınıflandırılmıştır. Yüksek kalsiyum oksit seviyelerine sahip C sınıfı uçucu kül, genellikle kendi kendini çimentolama özelliklerine sahip görülmüştür. Küresel olarak incelendiğinde ise uçucu kül bileşimi açısından, Hindistan'dan gelen uçucu küllerin, ortalama olarak ABD ve Çin'den gelen uçucu küllerden daha yüksek seviyelerde silikon dioksit içerdiği sonucuna varılmıştır. Uçucu küller için optimum nem içeriği değerleri ise %11- %53 arasında

değişmiş ve maksimum kuru yoğunluk değerleri ise 1,01 ila 1,78 g/cm³ arasında değişmiştir. Saf uçucu külün geçirgenliği genellikle 104 ila 10⁻⁷ cm/s arasında değişmiş ve sürtünme açısının ise 25 ila 40 arasında değiştiği görülmüştür.

Yüksel, Bilir ve Özkan (2006) çalışmalarında betonda taban külü (BA), granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) ve bu malzemelerin her ikisinin kombinasyonunun betonda ince agrega olarak kullanılmasının beton dayanıklılığını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Betonun dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek için dayanıklılık testleri yapılmış ve sonuçlar referans beton ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Üç seri olarak beton üretimi gerçekleştirilmiştir. GBFS, BA ve GBFS+BA, 3–7 mm boyutlu agrega ile değiştirilmiştir. Her seride yer değiştirme yüzdeleri %10, %20, %30, %40 ve %50 olacak şekilde beş test grubu oluşturulmuştur. Bu ikame malzemeler betonda öğütülmemiş form şeklinde kullanılmıştır. Farklı ikame oranlarının olası avantajlarını incelemek için betonların dayanıklılık özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre GBFS ve BA'nın ince agrega olarak kullanılması durumunda betonun bazı dayanıklılık özellikleri olumlu yönde etkilenmiştir. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık ve yüzey aşınması olumlu etkileyen özellikler olmuştur. Yan ürünlerin özellikleri ve ikame oranı, etki seviyesini ve yönünü kontrol etmektedir. SEM görüntüleri ve test sonuçlarının karşılaştırılması, GBFS ve BA'nın kimyasal ve fiziksel özelliklerinin beton dayanıklılığını etkileyen ana faktörler olduğunu göstermiştir. İnce agrega olarak GBFS ve BA kullanarak dayanıklı beton üretiminin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Tekin ve Tekin (2018) çalışmalarında süper akışkanlaştırıcıların (SA) kompoze çimentolar üzerindeki etkisi ve mineral katkıların boyutlarının kimyasal katkı ile uyumluluğunu araştırmışlardır. Bu çalışmada üretimi gerçekleşen çimento harçları üzerinde standart kıvam, priz süreleri, genleşme deneyleri ve hacim, çimento harçları üzerinde yayılma ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda Yatağan Termik Santralinden temin edilmiş olan 2 mm boyutlu taban külü tane boyutunu küçültmek amacıyla 120 mikron ve 60 mikron olmak üzere iki farklı incelikte öğütülmüştür. Öğütülen küller CEM I (PÇ 42,5R) tipi çimento ile ağırlıkça %0, 10%, 20% ve 30% oranlarında yer değiştirilmiştir. Deneyler esnasında iki farklı firmaya ait polinaftalin sülfonat (PNS) içerikli aynı özelliklere sahip süperakışkanlaştırıcı (SA) katkıları ayrı ayrı denenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, kullanılan mineral katkının inceliği basınç dayanımını artırırken priz sürelerini de hızlandırmıştır. Ayrıca PNS esaslı kimyasal katkılarda firma farkı ile çimento arasındaki

etkileşim önemli bir değişken olmuş ve bu değişken özellikle çimento harcı üzerinde önemli etkiler oluşturmuştur.

Hashemi vd. (2018) çalışmalarında harç malzemesi ince agrega ikamesi olarak taban külü kullanımının, mikroyapı ve mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Taban külü ile silis kumu ikamesi, toplam ince agreganın %40'ının altında kaldığında Portland çimentosu esaslı harcın basınç dayanımının iyileştiği görülmüştür. Daha yüksek hacim oranlarında ikame kullanılması ile matris tam tersi bir sonuç vermiştir. Bu azalmanın, karışım suyunun emilmesine ve harcın toplam gözenek hacminde bir artışa neden olan taban külünün gözenekli yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile su/çimento oranının 0,3'ün üzerinde olduğu yerlerde, taban külü harç karışımının mekanik özellikleri gelişmişken, sistem suyunun az olduğu yerlerde ise yetersiz kaldığı görülmüştür.

Sharma, Arora, Ojha, Singh ve Patel (2021) çalışmalarında kömür beslemeli termik santralin üç farklı konumundan toplanan taban külü kullanmışlardır. Kullanılan taban külleri ile (Taban Külü I, Taban Külü II ve Taban Külü III) vibro sıkıştırma makinası kullanılarak IS:2185'te belirtilen spesifikasyona göre beton blok oluşturulmuştur. Oluşturulan beton bloklarda 3 farklı oran (%30, %40 ve %50) ile kum ikamesi yapmış ve yapılan deneyler sonucunda yalnızca %30 oranında kum ikamesi içeren beton blokların imalata uygun olduğu belirlenmiştir.

Ibrahim, Keong, Johari, Rashid, ve Ariffin (2019) Portland çimento ikamesi olarak, kömür taban külü kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Çimento/kum oranları 1/2,5 ve 1/1,75 olacak şekilde farklı oranlarda harçlar hazırlanmıştır. Referans numuneler ile akışkanlık, basınç dayanımı, gözeneklilik, su emme ve gaz geçirgenliği üzerindeki etkiler karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sırasında Portland çimentosu yerine ikame edilen kömür taban külünün harç karışımlarında gerekli olan su gereksinimini önemli derecede arttırdığı görülmüştür. Bu özelliği bakımından taban külü, uçucu külün su talebini azaltması ve harçlarda betonun işlenebilirliğini arttırdığı yönündeki bilinen etkisinin tersi olarak veriler ortaya koymuştur. Kömür taban külü partiküllerinin gözenekli yüzeyi ve düzensiz şekli, küresel şekilli pürüzsüz ve camsı yüzeye sahip uçucu kül partiküllerinden farklıdır. Bununla birlikte taban külü ikame edilmiş harç karışımlarının referans karışımlara göre çok daha az işlenebilirlik derecesine sahip olmasına rağmen %30 karışım oranına sahip harç karışımlarında bile sıkıştırılma sorunsuz bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu nedenle basınç dayanımı üzerindeki etkisi Portland çimentosunun kısmi ikamesi olarak taban külü içeren tüm

harç numunelerinde kür süresi ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. 1/2,5 harç karışımı için %10 ve %20, 1/2,75 harç karışımı için %10 oranında kömür taban külü ilavesinin etkisini 28, 56, 90'ıncı günlerde ve daha uzun kür sürelerinde mukavemeti arttırmış ancak gözeneklilik, su emme ve geçirgenliği azaltmıştır.

Keskin (2016) yapmış olduğu çalışmada, harç içerisinde çimento yerine perlit ve taban külünün kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada, deney sayısını azaltmaya çalışmış ve L9(3³) ortogonal dizi ile Taguchi metodunu kullanmıştır. Perlit/tabana külü oranı (P/TK), çimento ve su/çimento oranı (S/Ç) olarak adlandırdığı kontrol faktörleri ile harcın karakteristik özelliklerini araştırmak için bir deneysel çalışma ve istatistiksel analiz çalışması yapılmıştır. Varyans analiz metodu (ANOVA) kullanılmış, değişkenlerin harcın karakteristik özellikleri üzerindeki etki seviyeleri bulunmuştur. Tek yönlü varyans analiz sonucu olarak, çimentonun diğer iki değişkenden genel olarak daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Sengupta (2007) çalışmasında, toprak matrisinde Portland çimentosu ve bentonit kullanarak S/S prosesi ile zararlı atıkların sızıntı suyunu kontrol etmeye dayalı olarak optimum bir karışım bulmayı hedeflemiştir. Hem TCLP hem de SPLP testlerinden elde edilen sızıntı verileri, kirleticilerin çoğunun konsantrasyonunda kayda değer bir azalma olduğunu göstermiştir. Benzen, toluen ve ağır metaller (kurşun) gibi yüksek başlangıç konsantrasyonlarına sahip kirleticiler, sızıntıda %99'a varan bir azalma göstermiştir. Portland çimentosu ve bentonit yüzdesi en yüksek olan numune, en düşük yüzde ağırlık kaybına sahip olmuştur. Ayrıca çalışmada S/S sırasında üretilen hava emisyonları da değerlendirilmiştir. En yüksek emisyonlar Örnek 1'den (%20 Portland çimentosu-%20 bentonit-%15 su) ve ardından Örnek 3'ten (%20 Portland Çimentosu-%15 bentonit-%15 su) ve Örnek 2'den (%20 Portland çimentosu-%5) elde edilmiştir. Üretilen emisyon seviyelerindeki farklılıkların ek örnekleme ve analizlerle daha fazla araştırılması gerektiği ortaya konmuştur.

Konak (2018) çalışmasında taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun, standart beton üretimi sırasında ince agrega olarak eklenen kum yerine belirlenen oranlarda katılarak, taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Üretilen beton numunelerinde elastisite modülü, gerilme-şekil değiştirme davranışı, basınç mukavemeti ve tokluğundaki değişimler incelenmiştir. Çalışmada öncelikle kullanılacak tüm malzemelerin karakterizasyonunu ortaya koyan deneyler yapılmıştır. Sonrasında ise, taban külü ve yüksek fırın cürufu ayrı ayrı % 0, % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında kumun yerine ilave edilerek beton numuneleri hazırlamıştır. Son olarak,

hazırlanan numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük standart su kuru uygulaması gerçekleştirilmiş ve betonun mekanik özelliklerini tespit etmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde taban küllerinin ve granüle yüksek fırın cürufunun betonda ince agrega yerine kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

Singh ve Siddique (2016) çalışmalarında kömür taban külünün kumun kısmi ikamesi olarak betonun dayanım özellikleri üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada beton üretiminde basınç dayanımını incelemek için iki tip beton karışımı oluşturulmuştur. Her iki sınıf beton karışımında da kumun yerini %0, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 seviyelerinde taban külü kullanılmıştır. 90 günlük kürlenme yaşından sonra taban külü beton karışımlarının, sıkıştırma ve çekme dayanımının referans numunelere göre neredeyse aynı düzeylerde sonuç verdiği görülmüştür. Taban külü içerikli beton karışımları referans numunelere göre daha düşük elastisite modülü ve aşınma direnci sergilemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre taban külünün, belli oranlarla beton karışımlarında kullanılmaya uygun malzemeler olduğu ortaya konmuştur. Beton üretiminde kumun ikamesi süperplastikleştirici olmadan % 30'a kadar kömür taban külü kullanımına ve yapısal betonda süperplastikleştirici ile %50'ye kadar uygun olacağı ortaya konulmuştur. Ancak işlenebilirliğin sorun olmadığı diğer beton uygulamalarında %100 kömür taban külü kullanılabileceği ortaya konmuştur (kaldırım blokları, oyuk bloklar, kaldırımlar vb.).

Rha, Kang ve Kim (2000) yapmış oldukları çalışmada, S/S prosesi esnasında tehlikeli atıklar ile stabilize olan cüruf karışımının kimyasal karakteristiği üzerinde krom ve kurşun iyonlarının etkilerini araştırmışlardır. Ek olarak cüruf hidrasyonu içinde krom ve kurşunun etkileri incelenmiştir. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) ağırlıkça %5'lik oranında cüruf ile beraber kullanılmıştır. Çalışmada sadece cürufun değil, uçucu kül ve alçı taşı içeren sabitlenmiş materyalin fiziksel karakteristiği de araştırılmıştır. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, cüruf ve alçı taşı ikamesi ile çalışıldığında katılmış malzemenin basınç dayanımının arttığı ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada gerçekleşen fazlar mikro yapının yoğunlaşmasına neden olmuştur, beraberinde ağır metal iyonlarının da sızma miktarlarında azalma görülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

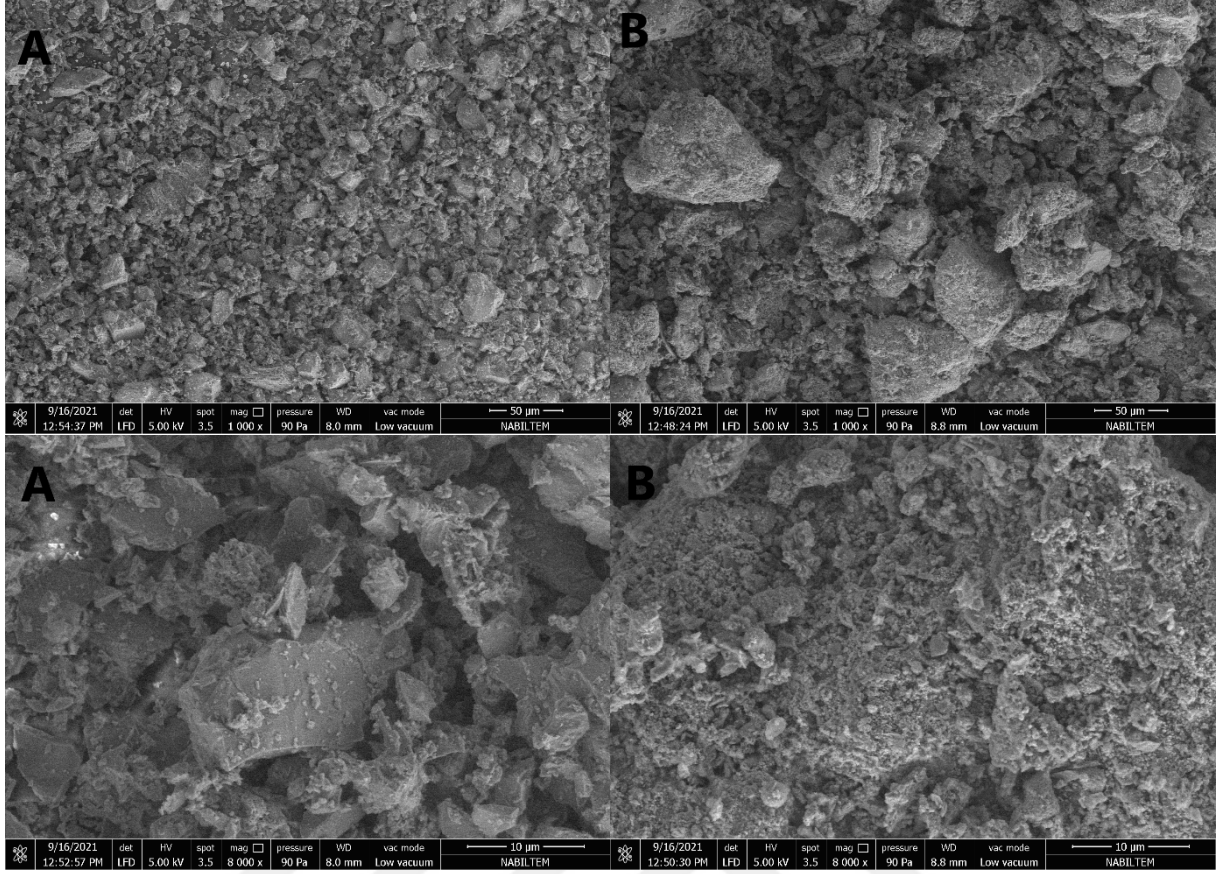
Deneysel çalışma kapsamında harç üretiminde CEM I 42,5 R çimento, CEN standart kum, taban külü, kimyasal katkı maddesi ve distile su kullanılmıştır.

3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ)

Çalışmada, TS EN 197-1 (Türk Standartları Enstitüsü, 2012)'e uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. PÇ'ye ait tane biçim ve yüzey dokusu özellikleri SEM görüntüleme tekniği kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.1a). PÇ taneciklerinin köşeli ve yüzey dokusunun pürüzsüz olduğu Şekil 3.1a'da görülmektedir. Çizelge 3.1'de çimentonun kimyasal analizi, Çizelge 3.2'de ise çimentonun fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento ve taban külü kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Miktar (ağırlıkça, %)	
	Çimento	Taban külü
Silis (SiO ₂)	19,535	41,05
Kalsiyum oksit (CaO)	64,342	8,80
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	4,605	17,21
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	3,091	12,48
Magnezyum oksit (MgO)	0,895	5,32
Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	1,022	5,13
Klorür (Cl)	0,013	0,008
Sülfat (SO ₃)	3,365	1,96
Kızdırma kaybı	2,548	7,59
Çözünmeyen kalıntı	0,285	45,77



Şekil 3.1. Çimento (A) ve atık taban külü (B) SEM görüntüleri

Çizelge 3.2. Çimento ve taban külünün fiziksel özellikleri

Özellik	Çimento	Taban külü
Priz başlangıç süresi (dakika)	195	-
Priz bitiş süresi (dakika)	270	-
Toplam genişleme (mm)	1,0	-
Yoğunluk (g/cm ³)	3,11	2,37
Özgül yüzey (cm ² /g)	4530	2740
45 µm elek kalıntısı (%)	1,6	16,8
90 µm elek kalıntısı (%)	0,2	0,4

3.1.2. Atık Taban Külü (ATK)

Çalışmada kullanılan atık taban külü Tekirdağ-Çorlu'da bulunan bir düzenli atık depolama sahasından temin edilmiştir. ATK iplik boyama, elektrik, buhar, sıcak su üretimi,

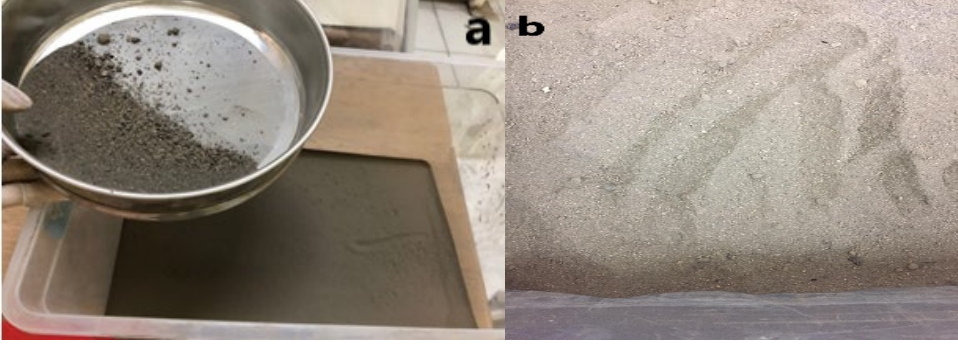
kağıt ürünleri, kağıttan mamul ve kağıt hammaddeleri imal eden bir tesisin yakma kazanlarından alınmıştır. ATK tesisten alındıktan sonra laboratuvar koşulları için yaklaşık 48 saat serilmiştir. Harç üretimlerinde iki farklı inceliğe sahip ATK tercih edilmiştir. Çimento yerine ATK ilavesi ile üretilen harç numunelerinin üretiminde 75 µm elek göz açıklığına sahip elekten elenen ve elek altına geçen malzeme (Şekil 3.2a), standart kum yerine ATK ilavesi ile üretilen harç numunelerin üretiminde ise 2 mm elek göz açıklığına sahip elekten elenen ve elek altına geçen malzeme (Şekil 3.2b) kullanılmıştır. ATK'nın kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de görülmektedir. 75 µm elek altına geçen ATK'ya ait fiziksel özellikler ise Çizelge 3.2'de verilmiştir. Ayrıca 2 mm elek altı ATK'ya ait granülometri eğrisi Şekil 3.3'de görülmektedir (incelik modülü, $k_{ATK} = 3,27$). 75 µm elek altına geçen ATK üzerinde SEM görüntülemesi yapılarak tane biçim ve yüzey dokusu özellikleri belirlenmiştir (Şekil 3.1b). Şekil 3.1a incelendiğinde ATK tanelerinin köşeli, yüzey dokusunun ise pürüzlü ve yapısının gözenekli olduğu görülmektedir.

ATK'nın çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılabilirliği açısından harç üretiminde kullanılan ATK'nın dayanım aktivite indeksi önemli bir göstergedir. Bu amaçla ATK'nın 28 günlük dayanım aktivite indeksi TS EN 450-1 (TSE, 2006) standardına göre belirlenmiştir (Çizelge 3.3). ATK ile üretilen harç numunelerinin 28 günlük dayanım aktivite indeksi TS EN 450-1 (TSE, 2006) standardında verilen sınır değeri ($\%79,8 > \%75$) sağlamaktadır. Cheriafa, Rochaa ve Perab(1999) kömür taban külünün puzolanik özelliklerini araştırmışlar. Eşit miktarda kalsiyum hidroksit ve taban külü içeren sade hamurlar hazırlanmış ve farklı yaşlarda dayanıklılıkları analiz edilmiştir. Avrupa standardı EN450'ye göre standart harçlar üzerinde belirlenen Portland çimentosu ile dayanım aktivite indeksleri 28 günde 0.88'e ve 90 günde 0.97'ye ulaşmaktadır. Bu değerler beton yapımında taban külü kullanımına izin verebileceği belirtilmiştir.

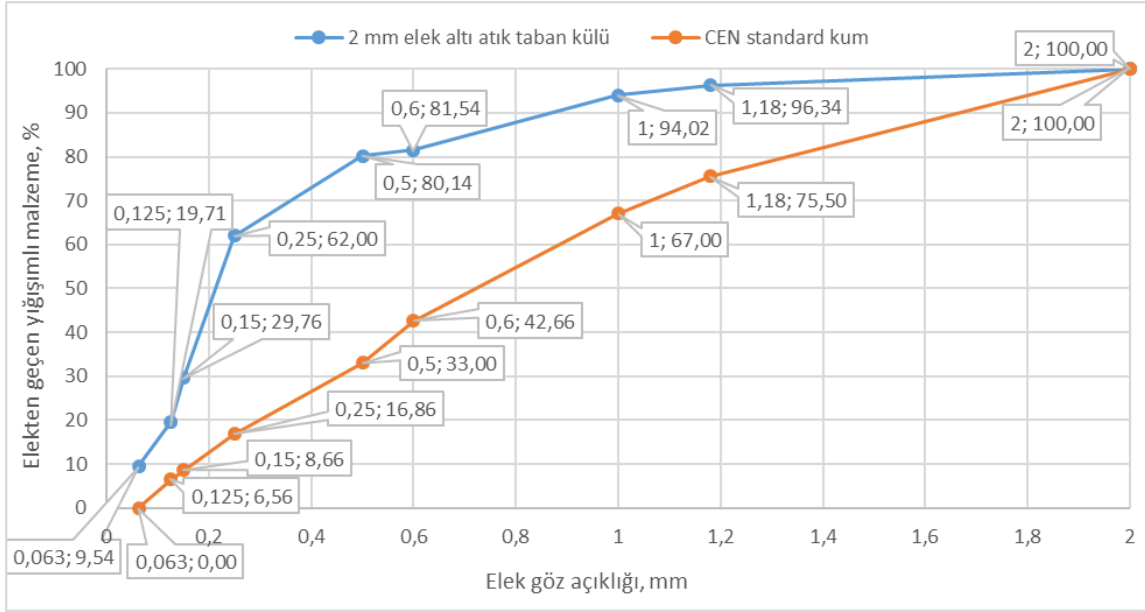
Çizelge 3.3. ATK'nın 28 günlük dayanım aktivite indeksi

Numune	Karışım oranı	PÇ (g)	ATK (g)	fc (MPa)	Dayanım aktivite indeksi (%)	Sınır değer* (%)
Referans	%100 PÇ	900	-	48,7	-	-
ATK	%25 ATK+ %75 PÇ	675	225	38,9	79,8	75

* TS EN 450-1



Şekil 3.2. 75 µm (a) ve (b) elek altı taban külü



Şekil 3.3. 2 mm elek altı atık taban külü ve CEN standart kuma ait granülometri eğrileri

3.1.3. Kum (SK)

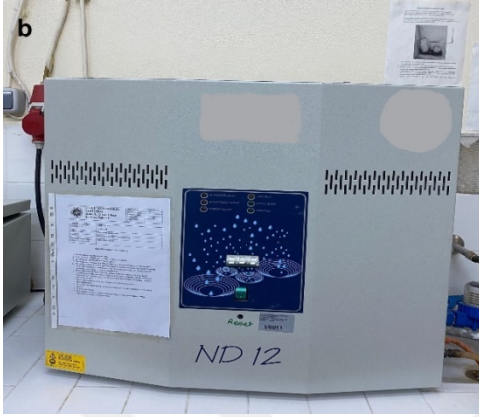
Çalışmada TS EN 196-1 (TSE, 2016) standardına uygun CEN standart kum kullanılmıştır. CEN Standart kum, ince taneli olan silisli bir kumdur. CEN standart kuma (SK) ait granülometri eğrisi Şekil 3.3’de görülmektedir (incelik modülü, $k_{SK} = 5,5$).

3.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi

Harç numune üretimlerinde işlenebilirlik belirli aralıkta (11 cm-17 cm) sabit tutulmuştur. Bu amaçla modifiye edilmiş polikarboksilat polimer esaslı sıvı yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldı.

3.1.5. Distile Su (S)

Harç üretiminde laboratuvar koşullarında yaklaşık 24 saat bekletilen distile su kullanılmıştır. Distile su cihazına ait görsel Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Distile su üretim cihazı

3.2. Yöntem

Atık taban külünün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında öncelikle kullanılacak ATK'nın, kimyasal analizi ve biçimsel (tane dağılımı, incelik ve tane biçim özellikleri vb.) karakterizasyonu yapılmıştır. Deneysel tasarımlarda yerdeğiştirme oranı (YO) ve numune yaşı (NY) etki değişkenleri, ultrasonik atımlı dalga hızı (V), eğilmede çekme dayanımı (f_f) ve basma dayanımı (f_c) ise tepki değişkenleri olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında ATK'nın çimento ve standart kum yerine kullanılabilirliği belirlenmiştir. Bu amaçla taze harç numunelerde yayılma deneyi (yayılma değeri belirli aralıkta sabit tutulmuştur), sertleşmiş harç numunelerde ise ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilmede çekme deneyi ve basma deneyi gerçekleştirilmiştir (her deneme noktası için 6 numune üretilmiştir). En yüksek basma dayanımına sahip numunelerde içyapı SEM görüntüleme teknikleri ile ortaya konmuştur. Ayrıca yerdeğiştirme oranı ve numune yaşı etki değişkenlerinin V, f_f ve f_c tepki değişkenleri üzerindeki etki düzeyleri ANOVA ile belirlenmiştir. ANOVA "Design Expert V.13" deneme programı ile gerçekleştirilmiştir (Statease, 2021). ATK'nın dayanım aktivite indeksi TS EN 450-1 standardına göre belirlenmiştir. ATK'nın solidifikasyon yöntemi ile farklı bir ürünün hammaddesi olarak kullanılmasının çevresel etkisinin belirlenmesi için üretilen harçlarda sızma deneyleri yapılmıştır. Sızma deneyleri ile kullanılan standarda göre sulu ortamda

çevresel ortama karışabilecek ağır metaller ve organik maddeler belirlenmiş ve standartlarda verilen değerlerle karşılaştırma yapılmıştır.

Çalışma kapsamında atık taban külünün (ATK) çimento (PÇ) ve CEN standart kum (SK) yerine kullanılabilirliği amacıyla üç farklı deneysel tasarım (DT) gerçekleştirilmiştir;

- DT1, çimento yerine atık taban külü kullanımı (su/PÇ+ATK),
- DT2, CEN standart kum yerine atık taban külü kullanımı (su/PÇ),
- DT3, CEN standart kum yerine atık taban külü kullanımı (su/çimento+k.ATK).

ATK'nın çimento yerine kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla (DT1) çimento ağırlığınca %0, %5, %10, %15, %25, %35 ve %50 oranlarında 75 µm elek altı ATK ikameli (çimentonun yerine kullanımı), 28, 60 ve 90 gün için ayrı ayrı olmak üzere 40×40×160 mm prizma harç numuneleri üretilmiştir. Bu amaçla toplam 126 (7·6·3) adet harç numunesi üretilmiştir ve harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. DT1'de üretilen harçlar için gerekli malzeme miktarları ve numune kodlamaları

Kod	PÇ, g	SK, g	Su, g	ATK, g	Süperakışkanlaştırıcı (bağlayıcı (PÇ+ATK) ağırlığınca), %
Referans	450,0	1350	225	0,0	0
ATK-PÇ%5	427,5	1350	225	22,5	0
ATK-PÇ%10	405,0	1350	225	45,0	0
ATK-PÇ%15	382,5	1350	225	67,5	0
ATK-PÇ%25	337,5	1350	225	112,5	0
ATK-PÇ%35	292,5	1350	225	157,5	0
ATK-PÇ%50	225,0	1350	225	225,0	0,85

Not: Miktarlar 3 numune için verilmiştir.

ATK'nın standart kum yerine kullanılabilirliğinin belirlenmesi için SK ağırlığınca %0, %15, %25, %35, %50, %70 ve %100 oranlarında 2 mm elek altı ATK ikameli (standart kum yerine kullanım) 40×40×160 mm prizma harç numunesi üretilmiştir (DT2 ve DT3). ATK'nın yüksek ikame oranlarında istenilen işlenebilmenin kimyasal katkı ilavesi ile sağlanamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle SK yerine 2 mm elek altı ATK ikameli numune tasarımları iki

farklı şekilde gerçekleştirilmiştir (DT2 ve DT3). DT2’de kimyasal katkı maddesi kullanılarak istenilen yayılma aralığı elde edilebilen %0, %15 ve %25 ilave oranlarında 28, 60 ve 90 günlük harç numune üretimi gerçekleştirilmiştir (3·6·3 = 54 adet) ve değerlendirme bu ikame oranları için yapılmıştır. DT2 harç üretiminde kullanılan malzeme bileşen oranları ve kodlamalar Çizelge 3.5’de görülmektedir. DT3’de ilave edilen taban külünün mineral katkı aktivitesini de dikkate alan “k” faktörüne göre harç bileşim malzeme miktarları belirlenmiştir. Bu tasarımda CEN standart kum ağırlığınca %0, %15, %25, %35, %50, %70 ve %100 oranlarında taban külü kullanımında istenilen yayılma aralığını sağlamak amacıyla her bir oran için farklı “k” faktörü değeri seçilmiştir. Harç üretiminde Su/(PÇ+k·ATK) oranı %50’de sabit tutulmuş olup toplam 126 (7·6·3) adet 40×40×160 mm prizma numune üretilmiştir. DT3 harç üretimlerinde kullanılan malzeme bileşen miktarları ve kodlamalar Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.5. DT2 için üretilen harç numunelerde kullanılan malzeme bileşim miktarları ve numune kodlamaları

Kod	PÇ, g	SK, g	Su, g	ATK, g	Süperakışkanlaştırıcı (bağlayıcı (PÇ+TK) ağırlığınca), %
Referans	450,0	1350	225	0,0	0
ATK-SK%15	427,5	1350	225	22,5	1,73
ATK-SK%25	405,0	1350	225	45,0	5,96

Not: Miktarlar 3 numune için verilmiştir.

Çizelge 3.6. DT3 için üretilen harç numunelerde kullanılan malzeme bileşim miktarları ve numune kodlamaları

Kod	k	PÇ, g	SK, g	Su, g	ATK, g	Süperakışkanlaştırıcı (PÇ+k·ATK ağırlığınca), %
Ref	0	450,0	1350,0	225,0	0,0	0
ATK-SK%15k	0,25	450,0	1147,5	250,5	202,5	1,08
ATK-SK%25k	0,35	450,0	1012,5	284,0	337,5	1,37
ATK-SK%35k	0,40	450,0	877,5	319,5	472,5	1,44
ATK-SK%50k	0,50	450,0	675,0	393,8	675,0	1,61

Çizelge 3.7. (devam) DT3 için üretilen harç numunelerde kullanılan malzeme bileşim miktarları ve numune kodlamaları

ATK-SK%70k	0,60	450,0	405,0	508,5	945,0	1,32
ATK-SK%100k	0,60	450,0	0,0	630,0	1350,0	1,86

Not: Miktarlar 3 numune için verilmiştir.

3.2.1. Harç Numune Üretimi ve Numune Kürü

Harç numuneleri TS EN 196-1 standardına (TSE, 2016) göre 40×40×160 mm kare prizma kalıplarda (Şekil 3.5a) üretilmiştir. Harç bileşen malzeme miktarlarının tartılması hassas terazide (Şekil 3.5b) yapılmıştır. Harç üretimi öncesi kalıplar yapışma olmaması için motor yağı ile yağlanmıştır (Şekil 3.5a).



Şekil 3.5. Harç numune kalıpları (a) ve hassas terazi (b)

Harç üretiminde, karıştırma süresi dikkate alınarak, tartılan malzemelerin belirli sıra ile karılmasıyla harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Harç numune üretim süreci aşağıda verilmiştir:

- Karıştırma kabına su eklenir ve ardından çimento ilave edilir.
- Karıştırıcı düşük hızda 30 saniye çalıştırılır ve 30 saniye sonunda kum 30 saniye boyunca ilave edilir. Karıştırıcı yüksek hıza ayarlanır ve 30 saniye çalıştırılır.
- 30 saniye hızlı karıştırma sonunda karıştırıcı durdurulur ve 15 saniye içerisinde lastik sıyrıcı ile kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyrılır ve kabın ortasında toplanır.
- Daha sonra karıştırmaya yüksek hızda 60 saniye daha devam edilir.
- Karıştırma süreci sonrası elde edilen harç, iç yüzeyi önceden yağlanmış kalıplara iki aşamada yerleştirilir.

- Harç kalıbı sarsma tablasına sıkıca oturtulur. Harç kalıbı ilk aşamada yarıya kadar doldurulur ve sarsma tablasında 60 düşme yaptırılır. Daha sonra harç kalıbı tamamen doldurulur ve tekrar sarsma tablasında 60 düşme daha yaptırılır.
- Harç kalıbı itina ile sarsma tablasından kaldırılır ve harcın fazlası hemen hemen dik tutulan bir metal masterla sıyrılır ve her yöne doğru bir kere enine testere hareketi ile çekilerek yavaş yavaş hareket ettirilir. Prizmaların yüzeyi aynı master yardımıyla hemen hemen düz tutularak düzleştirilir.

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerine, ilk 24 saat kalıpla beraber streç filme sarılarak sızdırmazlık kürü, kalıplardan çıkarılan harç numunelerine deney tarihine kadar 20 ± 1 °C kirece doymun su içinde kür uygulanmıştır. Harç numune üretimi ve numune kürüne ait görseller Şekil 3.6'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Harç numune üretimi ve numune kürü

3.2.2. Yayılma Tablası Deneyi

Harçların işlenilebilirliği TS EN 1015-3 (TSE, 2000) taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile) standardına göre belirlenmiştir. Hazırlanan taze harç, yayılma tablası üzerinde kesik koni şeklindeki kalıba yarısı dolacak şekilde yerleştirilir ve tokmak ile sıkıştırılır, daha sonra kalıbın diğer kısmı da doldurulur ve tekrar tokmak ile sıkıştırılır. Kalıbın üst yüzeyi mala ile düzleştirildikten sonra harçla dolu kalıp kaldırılır (Şekil 3.7). Saniyede bir düşüm olacak şekilde 15 düşüm yapılır. Düşüm yapıldıktan sonra taze harç numunesinin dairesel yayılması bir cetvel yardımı ile iki doğrultuda ölçülür. Elde edilen iki

doğrultudaki uzunlukların ortalaması alınarak taze harç numunesinin yayılma değeri belirlenir.



Şekil 3.7. Yayılma tablası deneyi

3.2.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (V) Deneyi

Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, “TS EN 12504-4 (TSE, 2021) Beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini” standardına göre belirlendi. Transduserler numunelerin 40×40 mm kesit yüzeylerine karşıt olarak yerleştirilerek doğrudan iletim yoluyla ultrasonik atımlı dalga süresi μs olarak ölçülmektedir (geçiş yol uzunluğu tüm numuneler için 160 mm’dir) (Şekil 3.8). Elde edilen veriler kullanılarak ultrasonik atımlı dalga hızı Eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$V = L/T \quad (3.1.)$$

V: Ultrasonik atımlı dalga hızı, km/s,

L: Yol uzunluğu, mm,

T: Ultrasonik atımlı dalganın geçiş yolunu katetmesi sırasında geçen süre, μs .



Şekil 3.8. UPV deney düzeneği

3.2.4. Eğilmede Çekme Deneyi

Eğilmede çekme deneyi, “TS EN 196-1 (TSE, 2016) Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına göre yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı (f_f) 40×40×160 mm boyutlarındaki numunelere üç noktadan yükleme yapılarak belirlenmiştir (Şekil 3.9). Eğilmede çekme dayanımı Eşitlik 3.2 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$f_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (3.2.)$$

f_f : Eğilmede çekme dayanımı, MPa,

b : Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm,

F_f : Kırılma anında numune ortasına uygulanan yük, N,

l : Alt iki mesnet arasındaki mesafe, mm.



Şekil 3.9. Eğilmede çekme deneyi

3.2.5. Basma Deneyi

Basma deneyi, “TS EN 196-1 (TSE, 2016) Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına göre gerçekleştirildi. Basma dayanımı (f_c) eğilmede çekme dayanımı sonucu ikiye ayrılan numunenin her bir parçası üzerinde gerçekleştirilmektedir. Basma deney düzeneği Şekil 3.10’da görülmektedir. Elde edilen iki parçaya ait dayanımların ortalaması numunenin basma dayanımı olarak kabul edilmektedir. Basma dayanımı, 40×40 mm boyutlarındaki plakalar arasına yerleştirilen numunelerin kırılma anında uygulanan basma kuvveti kullanılarak Eşitlik 3.3 yardımı ile hesaplanır.

$$f_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.3.)$$

f_c : Basma dayanımı, MPa,

F_c : Kırılma anındaki en yüksek yük, N,

1600: Numune yüzey alanı (40·40 mm) mm².



Şekil 3.10. f_c deney düzeneği

3.2.6. Sızma Testleri

Çalışmada kullanılan ATK'ların bertaraf edildiği bölgeye sızma ile oluşabilecek etkiler “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” kapsamında Ek 1’de belirtilen TS-EN 12457-4 Atıkların Nitelendirilmesi Standardı’na göre partikül boyutu 4 mm’den küçük olacak şekilde sıvı/katı oranı 10 L/kg olan eluattan su ortamına geçen kirletici konsantrasyonları ölçülerek belirlenmiştir. ATK'nın verilen standarda göre yapılan sızma testi sonuçları Çizelge 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. Bu sızma testleri sonucunda atık taban küllerinin “İnert Atık” olarak muamele görecektir atıklar olarak sınıflandırılabilirdiği görülmektedir. Bu tip atıklar III. sınıf düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmektedir. Çalışmada kullanılan taban külleri inert atık sahalarına depo edilebildiğinden, bu ATK'lar kullanılarak üretilen harçların sızma sonucu etkilerinin belirlenmesi için 12457-4 Atıkların Nitelendirilmesi Standardı yerine USEPA tarafından geliştirilmiş olan RCRA SW-846’da Method 1311 kullanılmıştır. Bu metoda göre üretilen harçların sızma deneyleri sonrası toksisite belirlenmektedir. Bu test uygun bir ekstraksiyon sıvısı ile 100 gr’lık bir atık örneğinden elde edilen eluattaki kirleticileri temsil etmektedir (Talınlı, 2016). Standarda göre 20:1 sıvı-katı oranındaki bir karışım dakikada 30 devir ile 18-20 sa süre ile çalkalanır. Ekstraksiyon sıvısının pH’ı atık maddenin alkalinitesine bağlı olarak asetik asit ile 4.93 ± 0.05 olacak şekilde ayarlanır. Bu çalışmada bu standart kullanılarak ağır metal konsantrasyonlarının toksisite etkilerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla sözü edilen standarda göre tanımlanmış

olan zehirlilik ölçümü için sızıntı suyu prosedürü (TCLP) ile ekstraksiyon toksisite prosedürü (EPT) kullanılmıştır. Bu prosedüre göre izin verilen maksimum ağır metal değerleri ile ATK kullanılarak üretilen harçların sızma deneyleri sonrası sızıntıda ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Bu prosedüre göre üretilen harçlarda arsenik (As), kadmiyum (Cd), krom (Cr), kurşun (Pb) ve civa (Hg) ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 3.8. Kullanılan atık taban külünün “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” Ek-2 kapsamında eluat testi değerleri

Parametre	Birim	III.Sınıf Depolama Sınır Değerleri (İnert Atıklar)	Analiz sonuçları
Arsenik (As)	mg/L	0,05	<0,05
Baryum (Ba)	mg/L	2	0,34
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0,004	<0,003
Toplam Krom (Cr)	mg/L	0,05	0,04
Bakır (Cu)	mg/L	0,2	<0,05
Civa (Hg)	mg/L	0,001	<0,001
Molibden (Mo)	mg/L	0,05	<0,01
Nikel (Ni)	mg/L	0,04	<0,02
Kurşun (Pb)	mg/L	0,05	<0,05
Antimon (Sb)	mg/L	0,006	<0,005
Selenyum (Se)	mg/L	0,01	<0,005
Çinko (Zn)	mg/L	0,4	<0,05
Florür (F ⁻)	mg/L	1	0,48

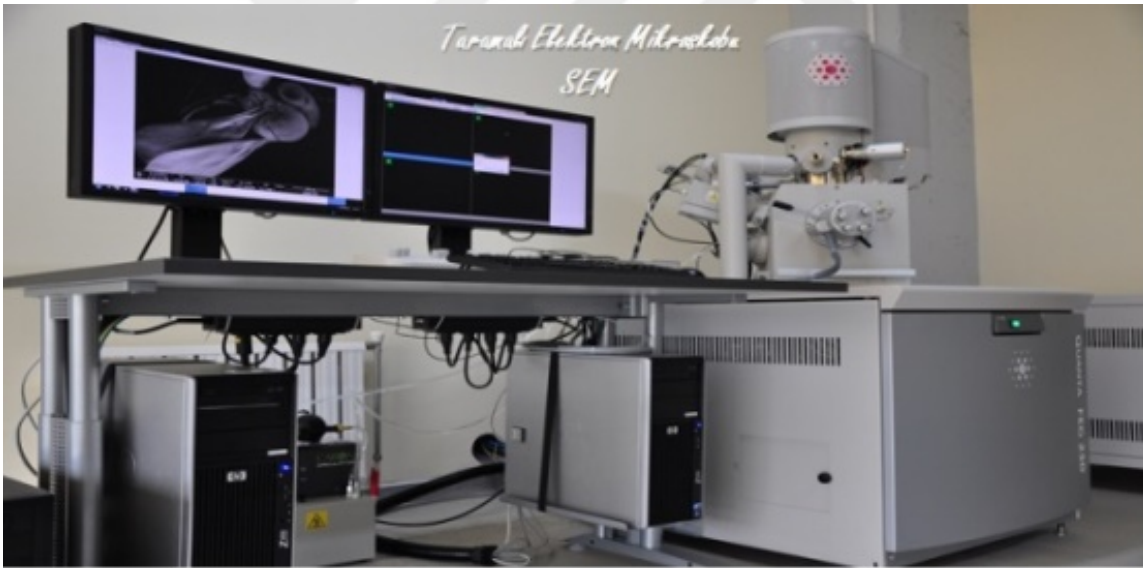
Çizelge 3.7. (devam) Kullanılan atık taban külünün “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” Ek-2 kapsamında eluat testi değerleri

Klorür (Cl ⁻)	mg/L	80	<10
Sülfat (SO ₄ ²⁻)	mg/L	100-600	318
Fenol İndeksi	mg/L	0,1	<0,1
Çözünmüş Organik Karbon (DOC)	mg/L	50	<5
Toplam Çözünen Katı (TÇK)	mg/L	400	349
BTEX (Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen)	mg/kg	6	<5
Mineral Yağ (C10-C40'a kadar)	mg/kg	500	<5
Toplam Organik Karbon (TOC)	mg/kg	30000 (%3)	<5030 (<%0,503)
PCBs (Toplam)	mg/kg	1	<0,625
LOİ (Yanma Kaybı)	-	-	0,61
pH	-	-	10,86

3.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taban külü ikameli harçların mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu SEM (scanning electron microscope) görüntüleri ile belirlenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) temelde optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilmektedir (Kapakin, 2006).

Bu görüntüler Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı NABİLTEM’de yapılmıştır. Cihazın Markası : FEİ, Cihazın Modeli : QUANTA FEG 250’dir ve cihaza ait görsel Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11. SEM cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. DT1 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar

DT1 tasarımında toplam 126 adet 40×40×160 mm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. DT1’de belirlenen deneme noktaları ve bu noktalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Her bir deneme noktası için 6 adet numune üretilmiş ve bunların ortalaması alınarak tek bir deneme noktası için deney sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneme noktaları (DT1)

Deneme noktası	Faktör 1	Factör 2	Tepki 1	Tepki 2	Tepki 3
	A:Numune yaşı	B:Yerdeğiştirme oranı	V	f _f	f _c
	Gün	%	km/s	MPa	MPa
1	28	0	4,50505	7,84063	48,7009
2	28	5	4,49022	7,81484	45,4421
3	28	10	4,45482	7,81133	41,9255
4	28	15	4,43832	7,33711	42,7492
5	28	25	4,40987	7,18516	38,8552
6	28	35	4,38984	7,12695	40,2109
7	28	50	4,26671	6,07188	42,1377
8	60	0	4,56733	7,21836	55,0633
9	60	5	4,53055	7,69023	50,7288
10	60	10	4,51559	7,37578	50,9117
11	60	15	4,50286	7,18945	47,0586
12	60	25	4,44036	7,46406	50,5644
13	60	35	4,37959	6,45078	43,3644
14	60	50	4,23862	6,39531	42,0446
15	90	0	4,53904	7,18438	58,5078

Çizelge 4.1. (devam) Deneme noktaları (DT1)

16	90	5	4,52202	6,93086	58,4839
17	90	10	4,48612	6,87656	56,7115
18	90	15	4,47553	7,47617	54,6318
19	90	25	4,42195	7,27852	48,179
20	90	35	4,38562	7,24766	44,7428
21	90	50	4,24784	6,75703	44,1049

4.1.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT1)

DT1 için üretilen numunelere ait yayılma tablası deney sonuçları numune kodlarına göre Çizelge 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Yayılma değerleri (DT1)

Numune kodu	Yerdeğiştirme oranı	Süperakışkanlaştırıcı (bağlayıcı (PÇ+ATK) ağırlığınca)	Yayılma değeri
	%	%	cm
Referans	0	0	17,05
ATK-PÇ%5	5	0	16,23
ATK-PÇ%10	10	0	15,60
ATK-PÇ%15	15	0	15,28
ATK-PÇ%25	25	0	12,53
ATK-PÇ%35	35	0	11,42
ATK-PÇ%50	50	0.85	11,42

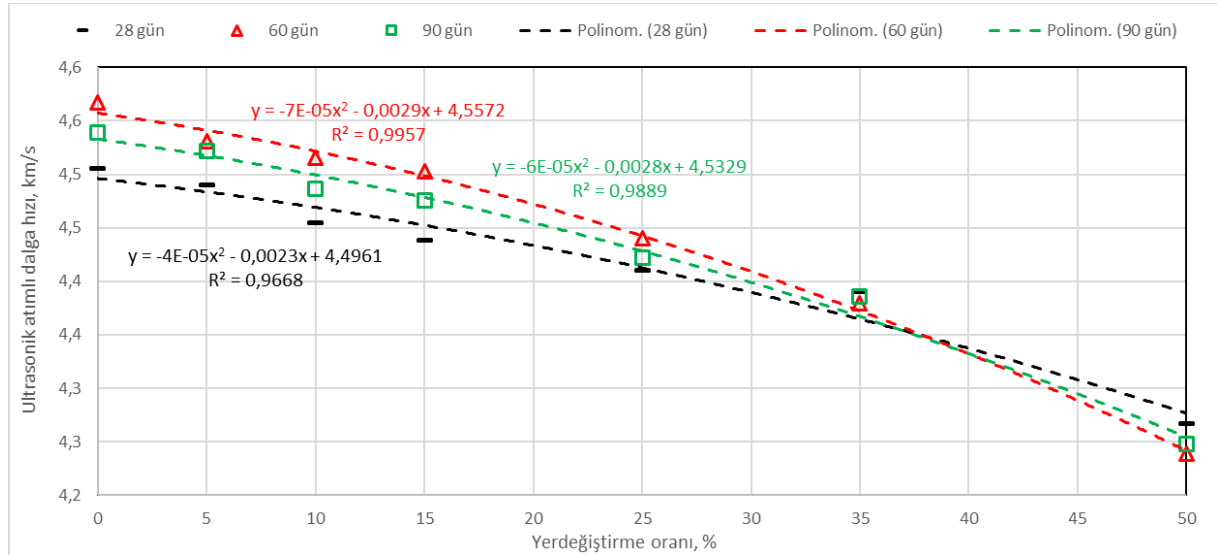
Çimento yerine ATK kullanımı yayılma değerini azaltmaktadır. Bu azalmanın yerdeğiştirme oranına bağlı olarak PÇ ve ATK tanelerinin yüzey dokusundaki farklılıktan kaynaklandığı söylenebilir. PÇ tanelerinin yüzey dokusu pürüzsüze yakın olmasına rağmen

ATK tanelerinin yüzey dokusu pürüzlü ve gözenekli bir yapıya sahiptir. Yüzey dokusunun gözenekli ve pürüzlü olması ATK ilave oranının yüksek olduğu numunelerde ıslatma suyunun yüksek olmasına neden olmakta ve bu durum da yayılma değerini düşürmektedir.

Yayılma değerinin 11-17 cm aralığında tutulabilmesi için %50 yerdeğiştirme oranına sahip numunelerin üretiminde kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

4.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT1)

Ultrasonik atımlı dalga hızının (V) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.1’de görülmektedir.



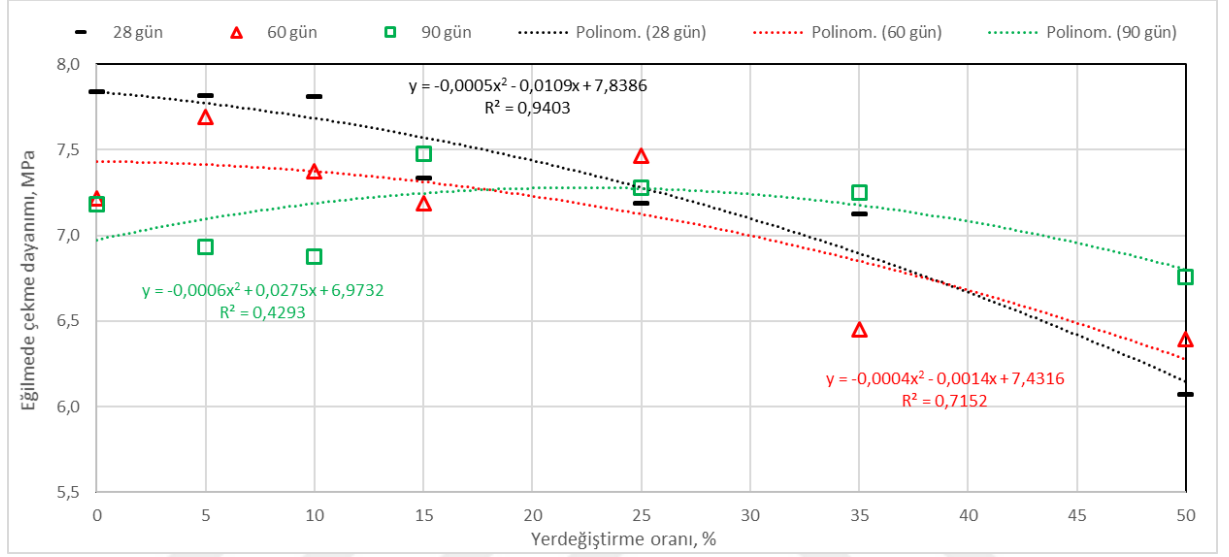
Şekil 4.1. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1)

Şekil 4.1 incelendiğinde tüm numune yaşları için V değerinde azalma olduğu görülmektedir. V değerinin azalması ultrases geçiş süresinin uzadığını yani numune içerisindeki boşluk miktarının arttığını göstermektedir. V değerine bağlı olarak betonun boşluk, çatlak vb. içeriğinin üniform dağılımı ve sıklığına bağlı olarak sınıflandırılması IS 13311-92 standardına (Hint Standartları, 1992) göre yapılmaktadır. Numuneler, 4,5 km/s ve üzerindeki V değerleri için kusursuz (üstün), 3,5-4,5 km/s aralığında ise iyi olarak sınıflandırılmaktadır (Hint Standartları, 1992). ATK ikameli üretilen numunelerde V değeri, %15 yerdeğiştirme oranına kadar ortalama 4,5 km/s, en düşük V değeri ise %50 yerdeğiştirme oranında ortalama 4,3 km/s olarak elde edilmiştir. Bu nedenle PÇ yerine çimento ağırlığına %50 ATK kullanımının V değeri açısından olumsuz etkisi bulunmamaktadır. V değerinin tahmin edilebilirliğinin yerdeğiştirme oranına bağlı olarak tüm yaş grupları için oluşturulan

ikinci derece model ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir (28, 60 ve 90 gün için R^2 değeri sırasıyla 0,967; 0,996 ve 0,989)

4.1.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT1)

Eğilmede çekme dayanımının (f_f) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.2’de görülmektedir.



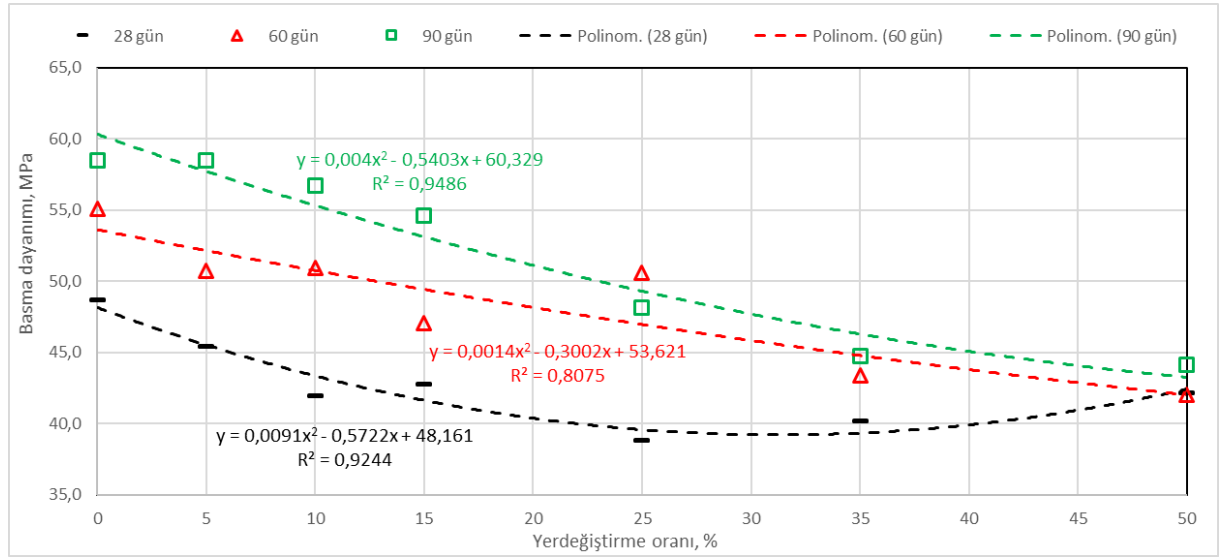
Şekil 4.2. f_f 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1)

Şekil 4.2 incelendiğinde f_f değerinin 28 ve 60 günlük numunelerde yerdeğiştirme oranına bağlı olarak azalma eğilimi, 90 günlük numunelerde ise %15 yerdeğiştirme oranına kadar kısmi bir artış eğilimi, yüksek yerdeğiştirme oranlarında azalma eğilimi göstermektedir. 28 ve 60 günlük numunelerdeki f_f değerinin yerdeğiştirme oranının artmasına bağlı olarak azalması bu yaşlarda PÇ'nin f_f üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. İleri yaşlarda (90 günlük) numunelerdeki ATK miktarının artması ile ATK'nın puzolanik etkisi ve PÇ'nin hidratasyonu ile oluşan portlanditi ($Ca(OH)_2$) bağlaması sonucu f_f değerinde yerdeğiştirme oranına bağlı olarak değişkenliği minimuma indirmiştir. 28, 60 ve 90 günlük numunelerde f_f değeri için oluşturulan ikinci derece modelin R^2 değerleri sırasıyla 0,940; 0,715 ve 0,429 olarak elde edilmiştir. 28 günlük numunelerde f_f değeri üzerinde genel olarak PÇ'nin etkili olması kontrol edilemeyen etki değişkenlerinin sınırlı olmasına neden olmaktadır ve bunun sonucunda yerdeğiştirme oranına bağlı olarak f_f 'in tahmin edilebilirliği artmaktadır (yüksek R^2). 90 günlük numunelerde ise hem PÇ hem de ATK malzemelerinin f_f üzerinde etkili olması ve dayanım kazanma sürecinin karmaşıklığı nedeniyle (kontrol edilemeyen etki

değişken sayısının artması) f_f değerinin tahmin edilebilirliği oldukça düşmektedir (düşük R^2). Tüm numune yaşlarında PÇ yerine %15 ATK kullanımının f_f değerinde herhangi bir kayba neden olmaması nedeniyle uygulamada PÇ yerine %15 ATK kullanılmasında sakınca olmadığı söylenebilir.

4.1.4. Basma Deney Sonuçları (DT1)

Basma dayanımının (f_c) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT1)

Şekil 4.3 incelendiğinde f_c değerinde tüm numune yaşlarında yerdeğiştirme oranına bağlı olarak azalma meydana gelmiştir. Yüksek yerdeğiştirme oranlarında numune yaşının basma dayanımı üzerindeki etki düzeyi azalmaktadır. 28 günlük numunelerde f_c değerindeki maksimum fark %25, 60 ve 90 günlük numunelerde ise %50 yerdeğiştirme oranlarında elde edilmektedir. 28, 60 ve 90 günlük numunelerde %25 yerdeğiştirme oranlarında dayanım aktivite indeksleri sırasıyla %79,8; %91,83 ve %82,35 olarak elde edilmiştir. Harç numunelerinin f_c değeri üzerinde yüksek ATK miktarının ileri yaşlarda (60 ve 90 günlük) etkili olduğu görülmektedir. Tüm numune yaşlarında PÇ yerine %15 ATK kullanımının f_c değerinde herhangi bir kayba neden olmaması nedeniyle uygulamada PÇ yerine %15 ATK kullanılmasında sakınca olmadığı söylenebilir.

Benzer bir çalışma Brás ve Faustino (2016) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada da beton/harç karışımlarında çimento yerine kömür taban külü kullanmıştır. Sonuçlar

değerlendiğinde kömür taban külünün beton/harçların işlenebilirliğini arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte taban külü kullanım miktarlarının artması ile harç ve betonun işlenebilirliğinin azaldığı görülmüştür. Taban külü kullanılan harçların tümünün basınç dayanımı ve sertlik gereksinimlerini karşıladığını görülmüştür. Çimento ikamesi olarak taban külü kullanım oranlarının %15 veya %20 değişim oranlarında uygun olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. % 10'dan fazla taban külü eklendiğinde, 28 günde taban külü için mekanik mukavemetteki azalmanın önemli bir parametre olmadığı belirtilmiştir. Kömür taban külü içeren betonlarda 60 günde 1,15 ila 1,20 kat arasında dayanım artışı olmuş ve puzolanik etkisini de arttırdığı görülmüştür.

Jun, Abdullah, Hussi, Jin ve Omar(2015) çalışmalarında portland çimento harcında taban külü ikamesinin farklı kürlenme sürelerinde basınç dayanımı incelenmiştir. Artan taban külü miktarı ve kür süresi (7 ve 28 gün) ile 27-29 N/mm²'ye kadar mukavemet elde edilmiştir. Taban külü ikamesi ayrıca külün tipine ve diğer araştırmalarda kullanılan oranlarına (%20-30) ve olması gereken karışım bileşimine bağlıdır. Bu araştırmada en yüksek basınç dayanımı %10'da elde edilmiştir. Bu sonucun ikame edilen taban külü karakteristiğininin yüksek oranda yanmamış karbon içeriği ve farklı faz dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.1.5. ANOVA (DT1)

Numune yaşı (A) ve yerdeğiştirme oranı (B) etki değişkenlerinin V , f_f ve f_c tepki değişkenleri üzerindeki etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ANOVA sonuçları sırasıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da görülmektedir.

Çizelge 4.3. V 'ye ait ANOVA (DT1)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	0,1742	5	0,0348	114,56	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	0,0004	1	0,0004	1,42	0,2514	
B-Yerdeğiştirme oranı	0,1669	1	0,1669	548,69	< 0.0001	
AB	0,0014	1	0,0014	4,49	0,0512	

Çizelge 4.4. (devam) V'ye ait ANOVA (DT1)

A ²	0,0023	1	0,0023	7,66	0,0144	
B ²	0,0036	1	0,0036	11,96	0,0035	
Artık	0,0046	15	0,0003			
Toplam	0,1788	20				

*Sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.5. f_f'e ait ANOVA (DT1)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	3,58	4	0,8952	16,35	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	0,0099	1	0,0099	0,1805	0,6766	
B-Yerdeğiştirme oranı	2,35	1	2,35	42,86	< 0.0001	
AB	0,8754	1	0,8754	15,98	0,0010	
B ²	0,3023	1	0,3023	5,52	0,0320	
Artık	0,8762	16	0,0548			
Toplam	4,46	20				

Çizelge 4.6. f_c'ye ait ANOVA (DT1)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	688,05	4	172,01	47,48	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	217,33	1	217,33	59,99	< 0.0001	
B-Yerdeğiştirme oranı	296,14	1	296,14	81,74	< 0.0001	
AB	47,62	1	47,62	13,14	0,0023	
B ²	27,76	1	27,76	7,66	0,0137	
Artık	57,97	16	3,62			
Toplam	746,02	20				

*Sd, serbestlik derecesi

DT1 tasarımında tüm tepki değişkenleri (V, f_f ve f_c) için elde edilen modeller anlamlıdır ($p_{\text{model}} < 0,0001$).

V üzerinde A ($p_A = 0,2514$) ve B ($p_B < 0,0001$) ana terimlerinden sadece B ana terimi etkilidir. AB etkileşim, A^2 ve B^2 ikinci derece terimleri de V üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

f_f üzerinde A ($p_A = 0,6766$) ve B ($p_B < 0,0001$) ana terimlerinden sadece B ana terimi etkilidir. Ayrıca AB etkileşim ve B^2 ikinci derece terimleri de f_f üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

f_c üzerinde hem A ($p_A < 0,0001$) hem de B ($p_B < 0,0001$) ana terimleri etkilidir. Ayrıca AB etkileşim ve B^2 ikinci derece terimleri de f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

Tepki değişkenlerine ait modeller sırasıyla Eşitlik 4.1, Eşitlik 4.2 ve Eşitlik 4.3'de görülmektedir. Ayrıca her bir tepki değişkeni için elde edilen modellerin uygunluğu uyum istatistiği ile belirlenmiştir ve Çizelge 4.7'da verilmiştir.

$$V = 4,42281 + 0,003418 \cdot A - 0,001508 \cdot B - 0,000019 \cdot AB - 0,000023 \cdot A^2 - 0,000055 \cdot B^2 \quad (4.1.)$$

$$f_f = 8,19373 - 0,013134 \cdot A - 0,023974 \cdot B + 0,00049 \cdot AB - 0,000504 \cdot B^2 \quad (4.2.)$$

$$f_c = 40,80176 + 0,22306 \cdot A - 0,256686 \cdot B - 0,003611 \cdot AB + 0,004832 \cdot B^2 \quad (4.3.)$$

Çizelge 4.7 Uyum istatistiği (DT1)

Tepki	Standard sapma	Ortalama	Varyasyon katsayısı, %	R^2	Ayarlı- R^2	Tahmini- R^2	Uygun kesinlik
V, km/s	0,0174	4,44	0,3929	0,9745	0,9660	0,9450	32,4973
f_f , MPa	0,2340	7,18	3,26	0,8034	0,7543	0,7157	15,5371
f_c , MPa	1,9000	47,86	3,98	0,9223	0,9029	0,8722	22,0002

Çizelge 4.7 incelendiğinde en yüksek R^2 değerinin V (0,9745), en düşük R^2 değerinin ise f_f (0,8034) tepki değişkenlerinde elde edildiği görülmektedir. Tüm tepki değişkenlerinin tahmin edilebilirliğinin yüksek olduğu ($R^2 > 0,80$), özellikle V ve f_c tepki değişkenlerinin ise oldukça yüksek olduğu ($R^2 > 0,92$) söylenebilir. Tüm tepki değişkenlerinin ayarlı- R^2 ve tahmini- R^2 arasındaki fark 0,2'den (Statease, 2021) küçüktür ve bu durum modele eklenen terimlerin tepki değişkenleri üzerinde yüksek etki düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm tepki değişkenleri için elde edilen uygun kesinlik değerinin > 4 olması modellerin seçilen değişim uzayında yeterli etki oluşturduğunu göstermektedir (Statease, 2021).

4.2. DT2 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar

DT2 tasarımında toplam 54 adet $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. DT2'de belirlenen deneme noktaları ve bu noktalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8'de verilmiştir. Her bir deneme noktası için 6 adet numune üretilmiş ve bunların ortalaması alınarak tek bir deneme noktası için deney sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. Deneme noktaları (DT2)

Deneme noktası	Faktör 1	Faktör 2	Tepki 1	Tepki 2	Tepki 3
	A:Numune yaşı	B:Yerdeğiştirme oranı	V	f_f	f_c
	Gün	%	km/s	MPa	MPa
1	28	0	4,505	7,841	48,701
2	28	15	4,378	8,228	64,441
3	28	25	4,149	5,859	51,960
4	60	0	4,567	7,218	54,533
5	60	15	4,394	8,633	68,846
6	60	25	4,128	5,995	54,082
7	90	0	4,539	7,184	58,508
8	90	15	4,424	8,397	73,509
9	90	25	4,189	7,652	67,077

4.2.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT2)

DT2 için üretilen numunelere ait yayılma tablası deney sonuçları numune kodlarına göre Çizelge 4.9'de görülmektedir.

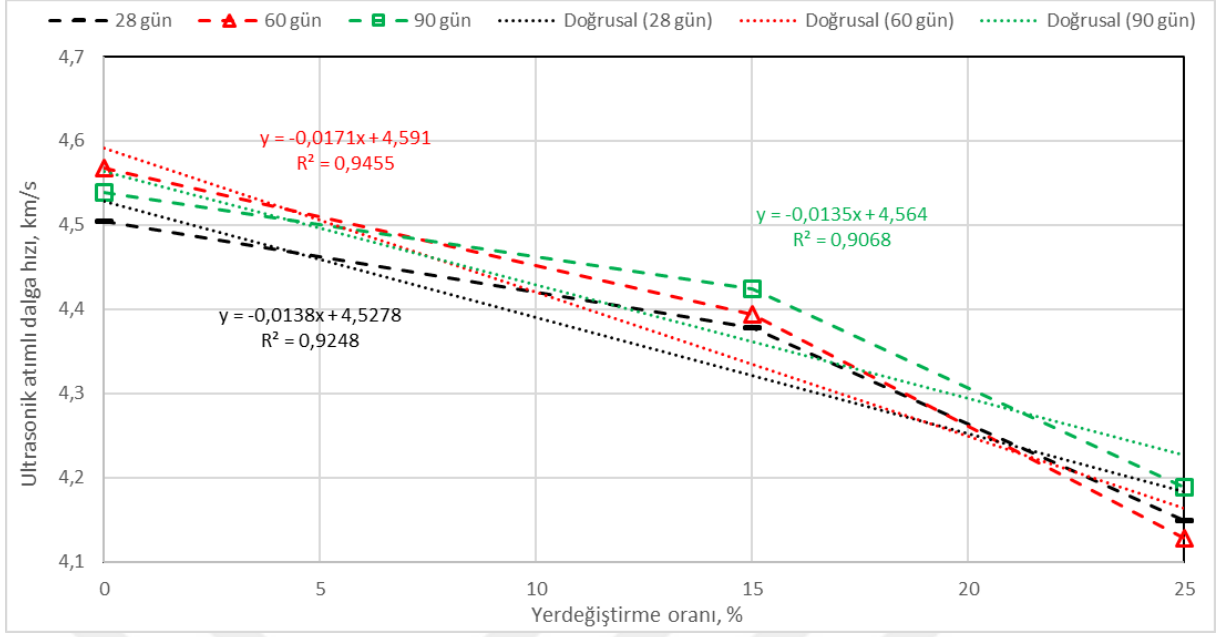
Çizelge 4.9. Yayılma değerleri (DT2)

Numune kodu	Yerdeğiştirme oranı	Süperakışkanlaştırıcı (bağlayıcı (PÇ+TK) ağırlığınca)	Yayılma değeri
	%	%	cm
Referans	0	0	17,05
ATK-SK%15	15	1.73	16,24
ATK-SK%25	25	5.96	12,60

Çizelge 4.9 incelendiğinde SK yerine ATK kullanımı harç numunelerinin işlenebilirliğini (yayılma değeri) azaltmaktadır. Özellikle %15 yerdeğiştirme oranından sonra işlenebilme için gerekli yayılma değeri ancak çok yüksek oranda kimyasal katkı maddesi kullanılarak sağlanabilmiştir. ATK tanelerinin SK tanelerine göre çok daha ince, tane yüzey dokusunun pürüzlü ve gözenekli olması nedeniyle düşük yerdeğiştirme oranlarında bile işlenebilirlik için kimyasal katkı kullanımını gerekli kılmıştır.

4.2.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT2)

Ultrasonik atımlı dalga hızının (V) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.4'de görülmektedir.

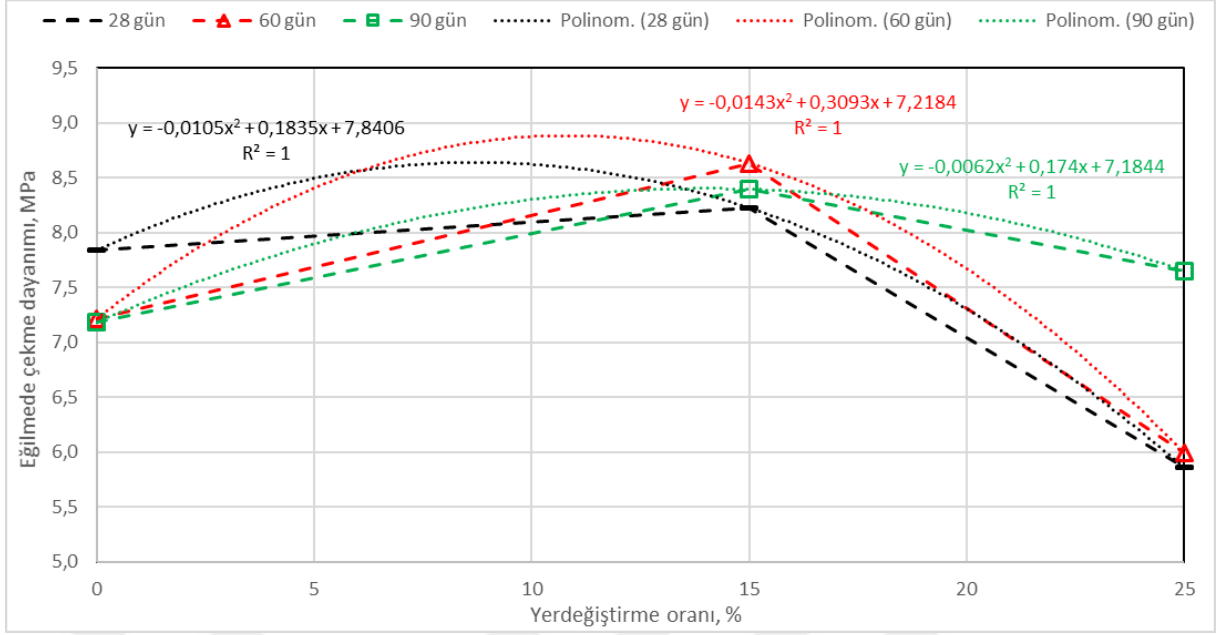


Şekil 4.4. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2)

Yerdeğiştirme oranı arttıkça V değerinin doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Numune yaşına bağlı olarak V değerindeki değişim oldukça düşüktür. Tüm numune yaşlarında yerdeğiştirme oranına bağlı olarak oluşturulan eğilim eğrilerinin R^2 değerleri $> 0,9068$ mertebelerindedir.

4.2.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT2)

Eğilmede çekme dayanımının (f_f) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.5'de görülmektedir.

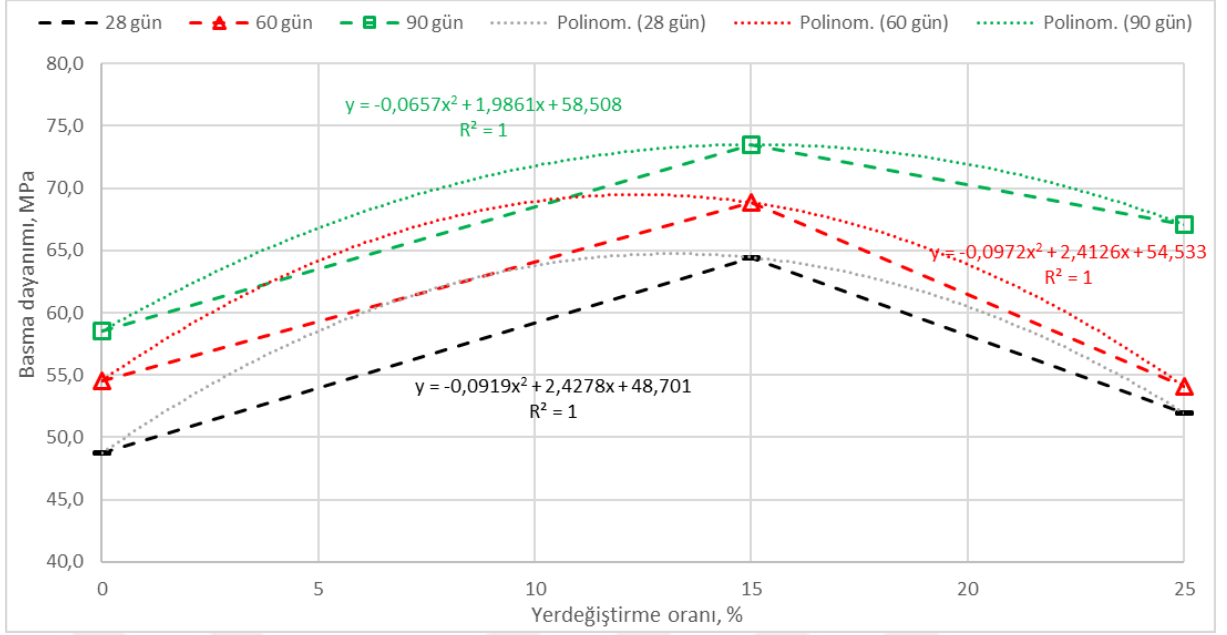


Şekil 4.5. f_f 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2)

Şekil 4.5 incelendiğinde, tüm numune yaşlarında %15 yerdeğiştirme oranının f_f değerinde artmaya neden olduğu görülmektedir. Yerdeğiştirme oranının %25 olması durumunda ise f_f değeri 28 ve 60 günlük numunelerde azalmaya neden olurken 90 günlük numunelerde ise anlamlı bir azalmaya neden olmamaktadır. Tüm numune yaşları için oluşturulan eğilim eğrilerinin denklemleri ikinci dereceden seçilmiş olup DT2 tasarımında sadece 3 noktada veri elde edilebildiği için R^2 değerleri 1 olarak elde edilmiştir. Tüm numune yaşlarında SK yerine %15 ATK kullanımının f_f değerinde herhangi bir kayba neden olmaması nedeniyle uygulamada SK yerine %15 ATK kullanılmasında sakınca olmadığı söylenebilir.

4.2.4. Basma Deney Sonuçları (DT2)

Basma dayanımının (f_c) yerdeğiştirme oranına ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.6'de görülmektedir.



Şekil 4.6. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT2)

Şekil 4.6 incelendiğinde, tüm numune yaşlarında f_c değerinde anlamlı düzeyde bir artma (sırasıyla 28, 60 ve 90 gün f_c , %0 yerdeğiştirme oranı için 48,701; 54,533 ve 58,503, %15 yerdeğiştirme oranı için 64,441; 68,846 ve 73,509, %25 yerdeğiştirme oranı için 51,960; 54,082 ve 67,077) gerçekleştiği görülmektedir. %15 yerdeğiştirme oranında tüm numune yaşlarında f_c değerinde artma gerçekleşmiştir. %25 yerdeğiştirme oranında f_c değerinde % 15 ATK ikameli numunelere göre tüm numune yaşlarında azalma, %0 ATK ikameli numunelere göre ise 90 günlük numunelerde artma gözlenirken, 28 ve 60 günlük numunelerde değişim gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Tüm numune yaşları için oluşturulan eğilim eğrilerinin denklemleri ikinci dereceden seçilmiş olup DT2 tasarımında sadece 3 noktada veri elde edilebildiği için R^2 değerleri 1 olarak elde edilmiştir. Tüm numune yaşlarında SK yerine %25 ATK kullanımının f_c değerinde herhangi bir kayba neden olmaması nedeniyle uygulamada SK yerine %25 ATK kullanılmasında sakınca olmadığı söylenebilir.

4.2.5. ANOVA (DT2)

Numune yaşı (A) ve yerdeğiştirme oranı (B) etki değişkenlerinin V , f_f ve f_c tepki değişkenleri ürerindeki etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Sırasıyla izelge 4.10, izelge 4.11 ve izelge 4.12’de görülmektedir.

Çizelge 4.10. V ’ye ait ANOVA (DT2)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	0,2264	3	0,0755	148,40	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	0,0024	1	0,0024	4,71	0,0821	
B-Yerdeğiştirme oranı	0,2185	1	0,2185	429,66	< 0.0001	
B^2	0,0162	1	0,0162	31,90	0,0024	
Artık	0,0025	5	0,0005			
Toplam	0,2290	8				

*Sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.11. f_f ’e ait ANOVA (DT2)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	7,20	4	1,80	10,84	0,0202	Anlamlı
A-Numune yaşı	0,1837	1	0,1837	1,11	0,3524	
B-Yerdeğiştirme oranı	1,28	1	1,28	7,72	0,0499	
AB	1,41	1	1,41	8,47	0,0436	
B^2	4,76	1	4,76	28,62	0,0059	
Artık	0,6647	4	0,1662			
Toplam	7,87	8				

*Sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.12. f_c 'ye ait ANOVA (DT2)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	557,32	3	185,77	28,69	0,0014	Anlamlı
A-Numune yaşı	191,38	1	191,38	29,56	0,0029	
B-Yerdeğiştirme oranı	21,57	1	21,57	3,33	0,1275	
B ²	320,47	1	320,47	49,50	0,0009	
Artık	32,37	5	6,47			
Toplam	589,69	8				

*Sd, serbestlik derecesi

DT2 tasarımında tüm tepki değişkenleri (V , f_f ve f_c) için elde edilen modeller anlamlıdır ($p_{\text{model-V}} < 0,0001$, $p_{\text{model-ff}} = 0,0202$ ve $p_{\text{model-fc}} = 0,0014$).

V üzerinde A ve B ($p_A = 0,0821$) ve B ($p_B < 0,0001$) ana terimleri anlamlı etkiye sahiptir. Fakat B ana teriminin anlamlılık düzeyi A ana teriminin anlamlılık düzeyine göre çok daha yüksektir. Ayrıca B² ikinci derece teriminin de V üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

f_f üzerinde A ($p_A = 0,3524$) ve B ($p_B = 0,0499$) ana terimlerinden sadece B ana terimi anlamlı etkiye sahiptir. Ayrıca AB etkileşim ve B² ikinci derece terimleri de f_f üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

f_c üzerinde A ($p_A = 0,0029$) ve B ($p_B = 0,1275$) ana terimlerinden sadece A ana terimi anlamlı etkiye sahiptir. Ayrıca B² ikinci derece terimi de f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

Tepki değişkenlerine ait modeller sırasıyla Eşitlik 4.4, Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.6'da görülmektedir. Ayrıca her bir tepki değişkeni için elde edilen modellerin uygunluğu uyum istatistiği ile belirlenmiştir ve Çizelge 4.13'de verilmiştir.

$$V = 4,49875 + 0,000645 \cdot A - 0,000156 \cdot B - 0,000604 \cdot B^2 \quad (4.4.)$$

$$f_f = 8,20620 - 0,013346 \cdot A + 0,132017 \cdot B + 0,001521 \cdot AB - 0,010349 \cdot B^2 \quad (4.5.)$$

$$f_c = 43,10623 + 0,182153 \cdot A + 2,27546 \cdot B - 0,084951 \cdot B^2 \quad (4.6.)$$

Çizelge 4.13. Uyum istatistiği (DT2)

Tepki	Standard sapma	Ortalama	Varyasyon katsayısı, %	R ²	Ayarlı-R ²	Tahmini-R ²	Uygun kesinlik
V, km/s	0,0226	4,36	0,5168	0,9889	0,9822	0,9684	28,0451
f _f , MPa	0,4076	7,45	5,48	0,9155	0,8310	0,5092	9,8096
f _c , MPa	2,54	60,18	4,23	0,9451	0,9122	0,8243	15,5107

Çizelge 4.13 incelendiğinde en yüksek R² değerinin V (0,9889), en düşük R² değerinin ise f_f (0,9155) tepki değişkenlerinde elde edildiği görülmektedir. Tüm tepki değişkenlerinin tahmin edilebilirliğinin yüksek olduğu (R² > 0,9155) söylenebilir. V ve f_c tepki değişkenlerinin ayarlı-R² ve tahmini-R² arasındaki fark 0,2'den (Statease, 2021) küçüktür ve bu durum modele eklenen terimlerin tepki değişkenleri üzerinde yüksek etki düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. f_f tepki değişkeninin ayarlı-R² ve tahmini-R² arasındaki fark 0,2'den büyüktür ve bu durum modele eklenen terimlerin tepki değişkeni üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğunu fakat yüksek etki düzeyine sahip olmadığını göstermektedir. Ayrıca tüm tepki değişkenleri için elde edilen uygun kesinlik değerinin > 4 (Statease, 2021) olması modellerin seçilen değişim uzayında yeterli etki oluşturduğunu göstermektedir.

4.3. DT3 Tasarımına Ait Deneysel Sonuçlar

DT3 tasarımında toplam 126 adet 40×40×160 mm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. DT3'de belirlenen deneme noktaları ve bu noktalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14'de verilmiştir. Her bir deneme noktası için 6 adet numune üretilmiş ve bunların ortalaması alınarak tek bir deneme noktası için deney sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.14. Deneme noktaları (DT3)

Deneme noktası	Faktör 1	Factör 2	Tepki 1	Tepki 2	Tepki 3
	A:Numune yaşı	B:Yerdeğiştirme oranı	V	f _r	f _c
	Gün	%	km/s	MPa	MPa
1	28	0	4,505	7,841	48,701
2	28	15	4,242	7,698	53,307
3	28	25	4,101	6,849	50,501
4	28	35	3,954	6,802	46,380
5	28	50	3,749	6,033	42,756
6	28	70	3,468	4,542	34,948
7	28	100	3,261	3,385	33,414
8	60	0	4,567	7,218	54,533
9	60	15	4,269	7,880	53,330
10	60	25	4,118	7,741	54,828
11	60	35	3,959	7,338	50,233
12	60	50	3,750	5,843	40,185
13	60	70	3,477	4,295	32,074
14	60	100	3,251	3,802	31,491
15	90	0	4,539	7,184	58,508
16	90	15	4,244	8,647	60,545
17	90	25	4,068	8,002	58,473
18	90	35	3,935	6,804	54,125
19	90	50	3,762	6,866	40,478
20	90	70	3,492	5,918	31,643
21	90	100	3,289	4,795	33,388

4.3.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları (DT3)

DT3 için üretilen numunelere ait yayılma tablası deney sonuçları numune kodlarına göre Çizelge 4.15’de görülmektedir.

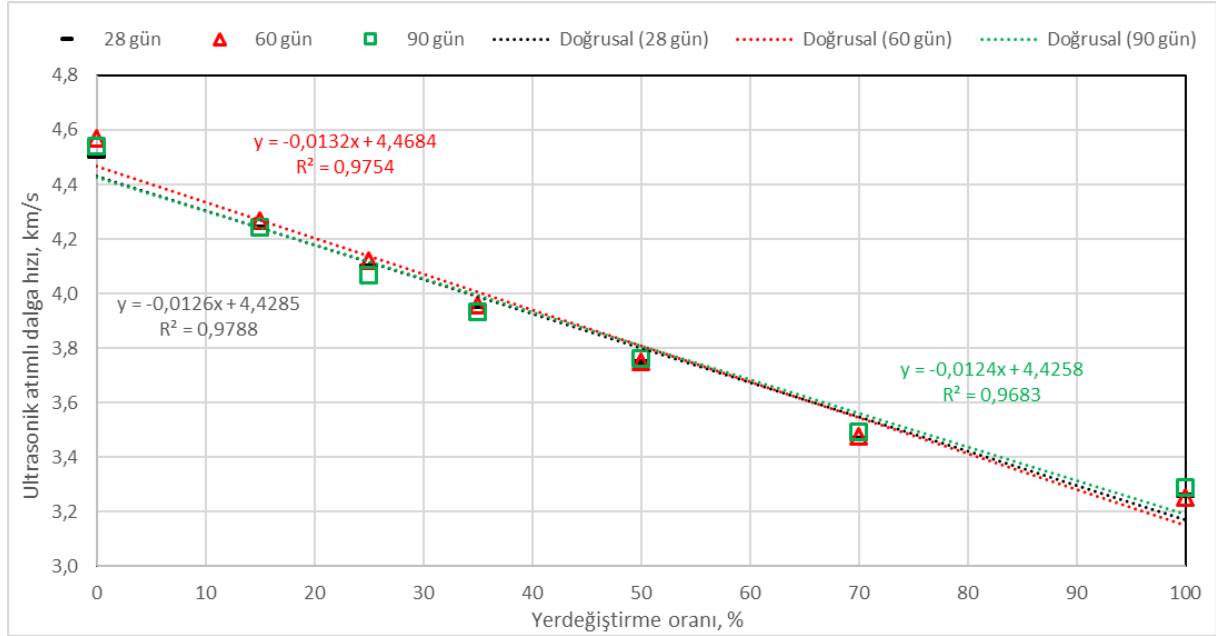
Çizelge 4.15. Yayılma değerleri (DT3)

Numune kodu	k	Yerdeğiştirme oranı	Süperakışkanlaştırıcı (PÇ+k·ATK ağırlığınca)	Yayılma değeri
	-	%	%	cm
Ref	0	0	0	17,05
ATK-SK%15k	0,25	15	1,08	14,12
ATK-SK%25k	0,35	25	1,37	13,47
ATK-SK%35k	0,40	35	1,44	12,28
ATK-SK%50k	0,50	50	1,61	12,48
ATK-SK%70k	0,60	70	1,32	13,57
ATK-SK%100k	0,60	100	1,86	13,67

SK yerine ATK kullanımı yayılma değerini düşürmektedir. Yüksek yerdeğiştirme oranlarında ATK ikameli harçların işlenebilirliği kimyasal katkı maddesi kullanılarak yeterli düzeyde iyileştirilememektedir. Bu nedenle DT3 tasarımında su/ PÇ yerine su/PÇ+k·ATK oranı dikkate alınmıştır. Yerdeğiştirme oranı arttıkça işlenebilme için gerekli k değeri büyümekte ve böylelikle harç üretiminde kullanılan su miktarı artmaktadır. DT3 tasarımında uygun işlenebilirlik hem kimyasal katkı maddesi hem de k değerine bağlı olarak üretime ilave edilen su ile sağlanmıştır. Yerdeğiştirme oranı yüksek harç üretimlerinde k değeri de 0,6 değerine kadar arttırılmıştır. Yerdeğiştirme oranının artması ile harç numunelerindeki ATK miktarı oldukça yüksek seviyelere çıkmaktadır. ATK malzemesinin ince taneli olması (incelik modülü, kATK = 3,27, kSK = 5,5) ve tane yüzey dokusunun pürüzlü ve gözenekli olması beklendiği gibi ıslatma suyu miktarını arttırmakta ve işlenebilirliği azaltmaktadır.

4.3.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları (DT3)

Ultrasonik atımlı dalga hızının (V) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.7’de görülmektedir.

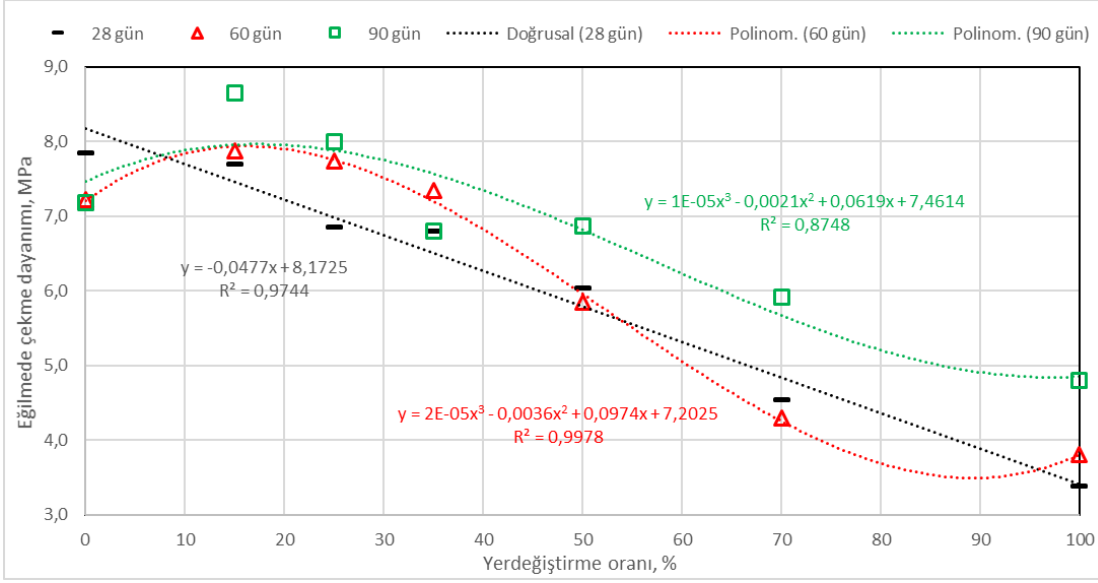


Şekil 4.7. V'nin yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3)

V değerinin numune yaşı ile değişmediği fakat yerdeğiştirme oranının artması (yerdeğiştirme oranının artması karışıma giren su miktarının da arttığı anlamına gelmektedir) ile azaldığı görülmektedir. Karışımında kullanılan su miktarının artması numunedeki boşluk miktarının artmasına neden olmaktadır. Boşluk miktarının artması da V değerindeki azalmayı açıklamaktadır. Yerdeğiştirme oranındaki artış ile V değerindeki azalma doğrusal bir değişim göstermektedir. Tüm numune yaşları için oluşturulan eğilim çizgileri doğrusal seçilmiş olup oldukça yüksek R² değerleri elde edilmiştir (> 9683).

4.3.3. Eğilmede Çekme Deney Sonuçları (DT3)

Eğilmede çekme dayanımının (f_f) yerdeğiştirme oranına ve numune yaşına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.8’de görülmektedir.

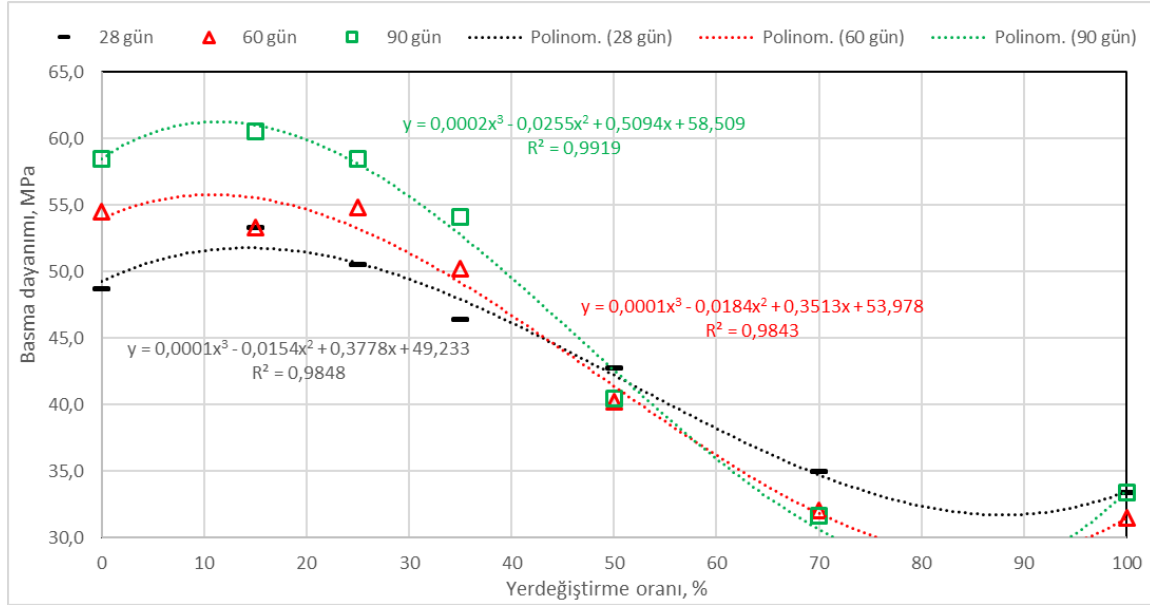


Şekil 4.8. f_t 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3)

f_t değeri yerdeğiştirme oranının artması ile numune yaşına bağlı olarak farklı değişim göstermektedir. 28 günlük numunelerde yerdeğiştirme oranı arttıkça f_t değerinde doğrusal bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle 28 günlük numunelere ait f_t sonuçları için eğilim çizgisi doğrusal olarak seçilmiştir ve oldukça yüksek R^2 değeri (0,9744) elde edilmiştir. 60 ve 90 günlük numunelerde f_t değeri yerdeğiştirme oranına bağlı olarak benzer davranış göstermektedir. %15 ve %25 yerdeğiştirme oranlarında elde edilen f_t değeri %0 yerdeğiştirme oranında elde edilen değerlerden daha yüksektir. Yüksek yerdeğiştirme oranlarında artan k değeri ile karışıma ilave edilen su miktarının artması ile beraber f_t değerinde de azalmalar meydana gelmiştir. 90 günlük numunelerde yüksek yerdeğiştirme oranlarındaki azalma 28 ve 60 günlük numunelerdekinden daha düşüktür. 60 ve 90 günlük numunelerde elde edilen f_t değerleri için eklenen eğilim çizgisi üçüncü derece seçilmiştir ve R^2 değerleri sırasıyla 0,9978 ve 0,8748 olarak elde edilmiştir. 28, 60 ve 90 günlük numuneler için elde edilen R^2 değerlerinin yüksek olması f_t değerlerinin tahmin edilebilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Tüm numune yaşlarında %0 yerdeğiştirme oranlarında elde edilen f_t değerleri yaklaşık olarak %35 yerdeğiştirme oranlarında da elde edilmiştir. Bu nedenle f_t açısından uygulamada SK yerine %35 ATK kullanımında herhangi bir dayanım kaybı yaşanmayacağı söylenebilir.

4.3.4. Basma Deney Sonuçları (DT3)

Basma dayanımının (f_c) yerdeğiştirme oranına ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. f_c 'in yerdeğiştirme oranı ve numune yaşına göre değişimi (DT3)

Yerdeğiştirme oranına bağlı olarak tüm numune yaşlarında f_c değerinde benzer değişim gözlemlenmiştir. %50 yerdeğiştirme oranına kadar numune yaşı arttıkça f_c değeri artmıştır. %50 üzerindeki yerdeğiştirme oranlarında ise f_c değerindeki azalma miktarı artarken tüm numune yaşlarında yaklaşık benzer f_c değerleri elde edilmiştir. 28, 60 ve 90 günlük f_c değerleri için eğilim çizgisi üçüncü dereceden denklem seçilmiştir ve R^2 değerleri sırasıyla 0,9848; 0,9843 ve 0,9919'dır. Yüksek R^2 değerleri f_c 'nin tahmin edilebilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Tüm numune yaşlarında %0 yerdeğiştirme oranlarında elde edilen f_c değerleri yaklaşık olarak %35 yerdeğiştirme oranlarında da elde edilmiştir. Bu nedenle f_c açısından uygulamada SK yerine %35 ATK kullanımında herhangi bir dayanım kaybı yaşanmayacağı söylenebilir.

DT2 tasarımına benzer bir çalışma Piyaathne ve Udamulla (2016) tarafından yapılmıştır. Piyaathne ve Udamulla (2016) çalışmalarında termoelektrik santrallerden üretilen taban külünden çimento harcı üretiminde yararlanmayı amaçlamışlardır. Çimento harcı üretiminde ince agrega (kum) için kısmi ikame malzeme olarak yakma fırını taban külünün kullanımını incelemiştir. Deneyde 2.36 mm elekten geçen yakma fırını dip külü ince agregaları ve 2.36 mm elekten geçen doğal kum kullanılmıştır. Su/çimento oranı 1,4:1'de sabit

tutulurken, kum değişimi hacimce %10'luk adımlarla %0 ile 40 arasında değişmiştir. Çalışma, harçta %30 oranında kumun değiştirilmesinin en yüksek basınç dayanımını sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca taban külü ikamesinin artmasıyla taze harcın işlenebilirliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, taban kül yüzdesinin artmasıyla taze ve sertleşmiş harcın yoğunluğunun azaldığını, sertleşmiş harcın su emmesinin arttığını ortaya koymuştur. Taze ve sertleştirilmiş durum parametreleri göz önüne alındığında, %30 taban külü ikamesi tanımlamasında en iyi performansı vermiştir.

4.3.5. ANOVA (DT3)

Numune yaşı (A) ve yerdeğiştirme oranı (B) etki değişkenlerinin V , f_f ve f_c tepki değişkenleri üzerindeki etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Sırasıyla Çizelge 4.16, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de görülmektedir.

Çizelge 4.16. V 'ye ait ANOVA (DT3)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	3,50	3	1,17	2251,51	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	0,0002	1	0,0002	0,3532	0,5601	
B-Yerdeğiştirme oranı	3,44	1	3,44	6634,24	< 0.0001	
B^2	0,0848	1	0,0848	163,35	< 0.0001	
Artık	0,0088	17	0,0005			
Toplam	3,51	20				

*Sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.17. f_f 'e ait ANOVA (DT3)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	42,61	5	8,52	49,43	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	2,32	1	2,32	13,47	0,0023	
B-Yerdeğiştirme oranı	13,48	1	13,48	78,21	< 0.0001	
AB	0,8255	1	0,8255	4,79	0,0449	
B ²	0,6501	1	0,6501	3,77	0,0712	
B ³	2,45	1	2,45	14,23	0,0018	
Artık	2,59	15	0,1724			
Toplam	45,19	20				

*Sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.18. f_c 'ye ait ANOVA (DT3)

Kaynak	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	1960,74	4	490,18	137,32	< 0.0001	Anlamlı
A-Numune yaşı	26,53	1	26,53	7,43	0,0150	
B-Yerdeğiştirme oranı	844,84	1	844,84	236,67	< 0.0001	
AB	59,46	1	59,46	16,66	0,0009	
B ³	238,56	1	238,56	66,83	< 0.0001	
Artık	57,12	16	3,57			
Toplam	2017,85	20				

*Sd, serbestlik derecesi

DT3 tasarımında tüm tepki değişkenleri (V , f_f ve f_c) için elde edilen modeller anlamlıdır ($p_{\text{model}} < 0,0001$).

V üzerinde A ($p_A = 0,5601$) ve B ($p_B < 0,0001$) ana terimlerinden sadece B ana terimi etkilidir. B² ikinci derece terimi de V üzerinde anlamlı etkiye ($p_{B2} < 0,0001$) sahiptir.

f_f üzerinde A ($p_A = 0,0023$) ve B ($p_B < 0,0001$) ana terimlerinden her ikisi de anlamlı etkiye sahiptir ancak B ana teriminin etki düzeyi çok daha yüksektir. Ayrıca AB etkileşim, B^2 ikinci derece ve B^3 üçüncü derece terimleri de f_f üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

f_c üzerinde hem A ($p_A < 0,015$) hem de B ($p_B < 0,0001$) ana terimleri etkilidir ancak B ana teriminin etki düzeyi çok daha yüksektir. Ayrıca AB etkileşim ve B^3 üçüncü derece terimleri de f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir. B^3 üçüncü derece teriminin etki düzeyi çok daha yüksektir ($p_{B3} < 0,0001$).

Tepki değişkenlerine ait modeller sırasıyla Eşitlik 4.7, Eşitlik 4.8 ve Eşitlik 4.9'da görülmektedir. Ayrıca her bir tepki değişkeni için elde edilen modellerin uygunluğu uyum istatistiği ile belirlenmiştir ve Çizelge 4.19'da verilmiştir.

$$V = 4,52947 + 0,000117 \cdot A - 0,019302 \cdot B + 0,000065 \cdot B^2 \quad (4.7.)$$

$$f_f = 7,4306 + 0,001186 \cdot A + 0,036531 \cdot B + 0,000247 \cdot AB - 0,00222 \cdot B^2 + 0,000014 \cdot B^3 \quad (4.8.)$$

$$f_c = 49,68235 + 0,150514 \cdot A - 0,207393 \cdot B - 0,002096 \cdot AB + 5,78478 \cdot 10^{-6} \cdot B^3 \quad (4.9.)$$

Çizelge 4.19. Uyum istatistiği (DT3)

Tepki	Standard sapma	Ortalama	Varyasyon katsayısı, %	R2	Ayarlı-R2	Tahmini-R2	Uygun kesinlik
V, km/s	0,0228	3,90	0,5834	0,9975	0,9970	0,9961	129,1529
f_f , MPa	0,4152	6,45	6,440	0,9428	0,9237	0,8821	21,4783
f_c , MPa	1,8900	45,90	4,120	0,9717	0,9646	0,9431	31,8515

Çizelge 4.19 incelendiğinde tüm tepki değişkenleri için ANOVA sonucunda elde edilen modellerin R^2 değerleri oldukça yüksektir ($R^2 > 0,9428$). Bu durum tüm etki değişkenleri için gerçek değerlerle tahmini değerlerin benzeştiğini göstermektedir. V, f_f ve f_c tepki değişkenlerinin ayarlı- R^2 ve tahmini- R^2 arasındaki fark 0,2'den (Statease, 2021)küçüktür ve bu durum modele eklenen terimlerin tepki değişkenleri üzerinde yüksek

etki düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm tepki değişkenleri için elde edilen uygun kesinlik değerinin > 4 (Statease, 2021) olması modellerin seçilen değişim uzayında yeterli etki oluşturduğunu göstermektedir.

4.4. Sızma Testi Sonuçları

Sızma testi için USEPA tarafından geliştirilmiş olan RCRA SW-846'da Method 1311'deki TCLP prosedürü kullanılmıştır. Bu standardın kullanılmasının nedeni atık taban küllerinin “Atıkların düzenli Depolanmasına dair Yönetmelik Ek-2” kapsamında inert atık olarak değerlendirilmelerinden dolayıdır. Bu yüzden ATK'lar kullanılarak üretilen harçların sızma ile çevreye verebilecekleri toksisite TCLP prosedürü kullanılarak belirlenmiştir. Bu prosedüre göre üretilen harçlar standardın öngördüğü şekilde asetik asit ile muamele edilmiş ve eluatta As, Cd, Cr, Pb ve Hg ölçülmüştür. Bu standarda göre kirleticilerin toksisite özelliği için maksimum konsantrasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır (Talınlı, 2016). Bu değerlendirmeye göre tüm harç numunelerinde Cd, Pb, Hg ve As değerleri 0 olarak bulunmuştur. Cr değerleri ise tüm harç numunelerinde maksimum konsantrasyon olan 5 mg/L'nin altında kalmıştır. Bu sonuçlara göre ATK düzenli depolama sahasına bertaraf edilecekse inert olarak değerlendirilebilmekte olup, ATK kullanılarak üretilen harçlar TCLP değerlerine göre ağır metal değerleri açısından toksik olmayan özelliktedirler.

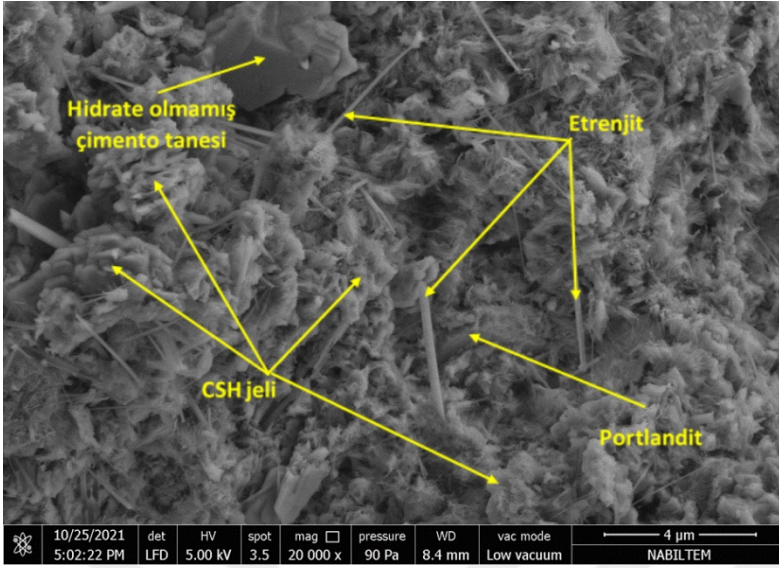
4.5. SEM Analizi

SEM analizi yapılan numunelere ait kodlamalar Çizelge 4.20'de görülmektedir.

Çizelge 4.20. SEM analizi numune kodlaması

Numune kodu	Tasarım kodu	k	Yerdeğiştirme oranı	f _c
		-	%	MPa
Referans	DT1, DT2 ve DT3	-	0	58,508
ATK-PC%25	DT1	-	0,25	48,179
ATK-SK%15	DT2	-	0,15	73,509
ATK-SK%25	DT2	-	0,25	67,077
ATK-SK%15k	DT3	0,25	15	60,545
ATK-SK%25k	DT3	0,35	25	58,125

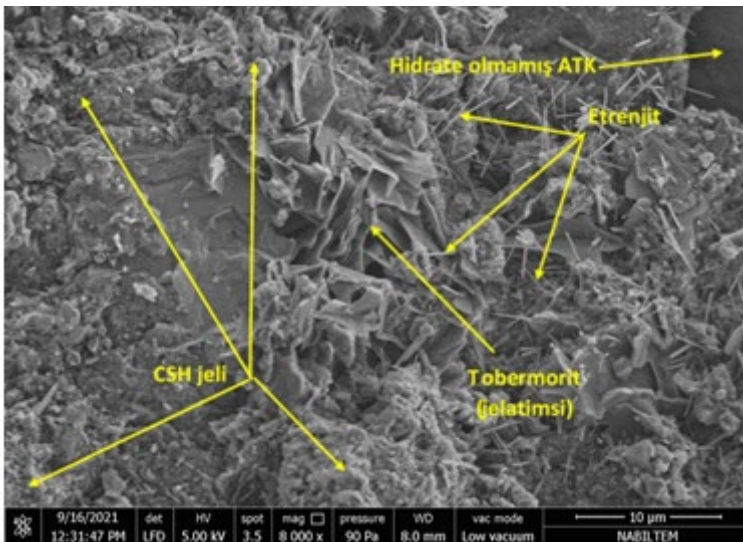
Referans numuneye ait SEM görüntüsü Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Referans numuneye ait SEM görüntüsü (DT1, DT2 ve DT3)

Referans numune SEM görüntüsü incelendiğinde çimento hidratasyonu sonucunda oluşan CSH (kalsiyum silika hidrat) jellerinin, etrenjit ve portlandit oluşumlarını gözlemlenmiştir. Ayrıca hidrate olmamış çimento tanelerinin de bulunduğu görülmektedir.

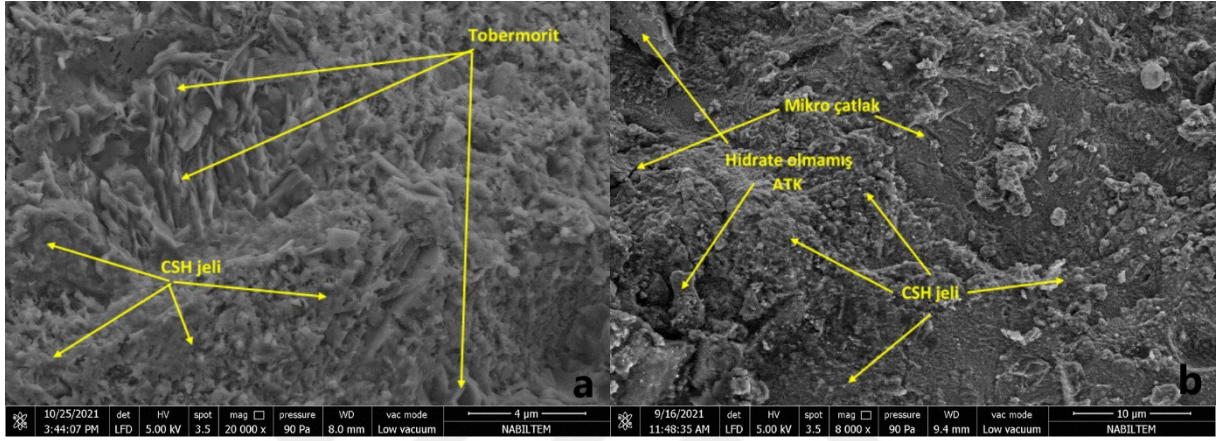
DT1 için seçilen ATK-PÇ%25 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. ATK-PÇ%25 numunesine ait SEM görüntüsü (DT1)

ATK-PÇ%25 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde CSH ve etrenjite ek olarak tobermorit (jelatimsi) jellerinin oluştuğu ve hidrate olmamış ATK tanelerinin bulunduğu görülmektedir. Jelatimsi tobermorit jellerinin boşluklu bir yapı oluşturması ve hidrate olmamış ATK tanelerinin bulunması basınç dayanımındaki azalmayı açıklamaktadır.

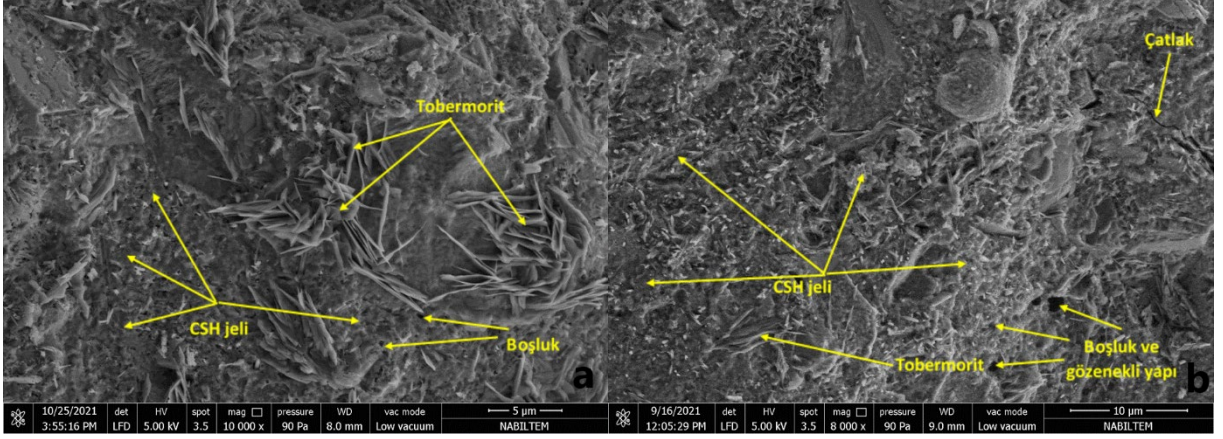
ATK-SK%15 ve ATK-SK%25 kodlu numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. ATK-SK%15 (a) ve ATK-SK%25 (b) numunelerine ait SEM görüntüleri (DT2)

ATK-SK%15 numunesine ait içyapıda çok yoğun olarak CSH ve tobermorit jellerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum referans numune ile oluşan 15 MPa’lık basma dayanım farkını açıklamaktadır. ATK-SK%25 numunesine ait içyapıda ise genel olarak CSH oluştuğu, ATK miktarının yükselmesi ile hidrate olmamış ATK tanelerinin olduğu ve yoğun olmamakla beraber çatlakların oluştuğu görülmektedir. ATK-SK%25 numunesine ait içyapı referans numunesine göre yoğun olmakla beraber ATK-SK%15 numunesine göre düşük yoğunluktadır. Bu durum ATK-SK%25 numunesinin basınç dayanımının referans numunesinden 8,6 MPa yüksek, ATK-SK%15 numunesinden 6,4 MPa düşük olmasını açıklamaktadır.

ATK-SK%15k ve ATK-SK%25k kodlu numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 4.13’de görülmektedir.



Şekil 4.13. ATK-SK%15k (a) ve ATK-SK%25k (b) numunelerine ait SEM görüntüleri (DT3)

ATK-SK%15k ve ATK-SK%25k kodlu numunelerin içyapısı benzer olmakla beraber karışımdaki su miktarının yüksek olduğu ATK-SK%25k kodlu numunede çatlak oluşumu ve boşluk miktarının artarak gözenekli bir yapı oluştuğu görülmektedir. ATK-SK%15k kodlu numunenin basınç dayanımı referans numunesinden sadece 2 MPa yüksektir. Karışımdaki su miktarı düşük olan ATK-SK%15 kodlu numunenin ise referans numunesinden yaklaşık 15 MPa yüksek olduğu unutulmamalıdır. Karışımda kullanılan su miktarının artması ile beklendiği gibi içyapıdaki boşluk ve gözenekli yapı artarak basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. İşlenebilirlik açısından yayılma değerinin ilave su (k değerine bağlı olarak) ile karşılanması yüksek dayanım kayıplarına neden olmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada Tekirdağ-Çorlu'da bulunan III. sınıf bir düzenli depolama sahasında bertaraf edilen inert özellikteki atık taban küllerinin stabilizasyon/solidifikasyon yöntemi kullanılarak harçlarda çimento veya kum yerine kullanılabilirliği ve inşaat sektörüne ekonomik bir girdi sağlama potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen harçların işlenebilirliği, ultrasonik dalgaların beton içerisinde yayılma hızının göstergesi olan ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilmede çekme dayanımı ve basma deneyleri yapılarak bu atıkların inşaat sektöründe kullanılabilme potansiyelleri değerlendirilmiştir. Ayrıca atık taban küllerinin TS-EN 12457-4 Atıkların Nitelendirilmesi Standardına göre sızma testleri ile tehlikelilik özellikleri belirlenmiş ve inert atık olarak değerlendirilebildiği belirlendikten sonra bu atıklar kullanılarak üretilen harçların TCLP deneyleri ile sızma testleri yapılarak zehirlilik potansiyelleri belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında açıklamaları tezin daha önceki bölümlerinde ayrıntılı şekilde verilen ve DT1, DT2 ve DT3 olacak şekilde kısaltmaları verilen üç farklı tasarım kullanılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen DT1, DT2 ve DT3 tasarımlardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

DT1 tasarımı;

- V ve f_c tepki değişkenleri için elde edilen modellerin tahmin edilebilirlikleri yüksek olmakla (sırasıyla R^2 , 0,9660, 0,9029) beraber f_f tepki değişkeninin düşük olduğu (R^2 , 0,8034) görülmüştür.
- A-Numune yaşı ana terimi, V ve f_f tepki değişkenleri üzerinde anlamlı etkiye sahip değildir (sırasıyla p-değeri, 0,2514, 0,6766), f_c tepki değişkeni üzerinde ise anlamlı etkiye sahiptir (p-değeri <0,0001).
- B-Yerdeğiştirme oranı ana terimi, V, f_f ve f_c tepki değişkenleri üzerinde anlamlı etkiye sahiptir (p-değeri < 0,0001).
- 28, 60 ve 90 günlük numunelerde %25 yerdeğiştirme oranlarında dayanım aktivite indeksleri sırasıyla %79,8; %91,83 ve %82,35 olarak elde edilmiş olup %75 değerini sağlamaktadır.

- Tüm numune yaşlarında PÇ yerine %15 ATK kullanımının f_c değerinde herhangi bir kayba neden olmaması nedeniyle uygulamada PÇ yerine %15 ATK kullanılmasında sakınca olmadığı söylenebilir.

DT2 tasarımı;

- V, ff ve f_c tepki değişkenleri için elde edilen modellerin tahmin edilebilirlikleri yüksektir (sırasıyla R^2 , 0,9889, 0,9155, 0,9451).
- A-Numune yaşı ana terimi, V ve f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir ($pV = 0,0821$, $pfc = 0,0029$) fakat ff üzerinde anlamlı etkiye ($pff = 0,3524$) sahip değildir.
- B-Yerdeğiştirme oranı ana terimi, V ve ff üzerinde anlamlı etkiye sahiptir ($pV < 0,0001$, $pff = 0,0499$) ancak V üzerindeki etki düzeyi çok daha yüksektir. B ana terimi f_c üzerinde anlamlı etkiye sahip değildir.
- CEN standard kum (SK) yerine %25 ATK kullanımı f_c değerinde tüm numune yaşlarında artış sağlamıştır. İşlenebilme probleminin kimyasal katkı maddesi kullanılarak çözülebilmesi durumunda uygulamada SK yerine %25 ATK kullanımı dayanım açısından sakınca oluşturmayacaktır.

DT3 tasarımı;

- V, ff ve f_c tepki değişkenleri için elde edilen modellerin tahmin edilebilirlikleri yüksektir (sırasıyla R^2 , 0,9975, 0,9428, 0,9717).
- A-Numune yaşı ana terimi, ff ve f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir ($pff = 0,0023$, $pfc = 0,015$) fakat V üzerinde anlamlı etkiye ($pV = 0,5601$) sahip değildir.
- B-Yerdeğiştirme oranı ana terimi, V, ff ve f_c üzerinde anlamlı etkiye sahiptir ($p < 0,0001$). Özellikle yerdeğiştirme oranı arttıkça karışıma ilave edilen ek su miktarının artması B-yerdeğiştirme oranı ana teriminin tepki değişkenleri üzerindeki anlamlı etki düzeyini artırdığı söylenebilir.
- CEN standard kum (SK) yerine yüksek oranda ATK kullanımı işlenebilirliği düşürmektedir. Yüksek yer değiştirme oranlarında sadece kimyasal katkı maddesi kullanılarak işlenebilmenin sağlanamadığı ve bu nedenle karışıma ilave su eklenerek çözüm üretilebilmektedir. Karışıma eklenen su miktarının artması ile dayanım azalmaktadır. SK yerine %35 ATK kullanımı f_c değerinde anlamlı bir düşmeye neden olmamaktadır (işlenebilmenin ek su ve kimyasal madde ile sağlanması durumu). İşlenebilme probleminin kimyasal katkı maddesi ve uygun ek

su ilavesi ile çözülebilmesi durumunda uygulamada SK yerine %35 ATK kullanımı dayanım açısından sakınca oluşturmayacaktır.

Çalışma sonuçlarına göre S/S yöntemi ile ATK'nın belli oranlarda çimento ve kum yerine kullanılabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca üretilen harçların TCLP prosedürü kullanılarak yapılan sızma testi ile toksisite değerlerinin de maksimum değerleri aşmadığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre Trakya bölgesinde iplik boyama, elektrik, buhar, sıcak su üretimi, kağıt ürünleri, kağıttan mamul ve kağıt hammaddeleri imal eden bir tesisin yakma kazanlarından alınan bu atık taban külleri Tekirdağ-Çorlu'da bulunan III.sınıf depolama sahasına bertaraf edilmek yerine belli oranlarda çimento ve kum ikamesi olarak kullanılabilecek özelliktedir. Böylece bertaraf tesislerinde alan ihtiyacı azalacak, çimento yerine kullanım dolayısıyla çimento üretiminden kaynaklanabilecek sera gazlarının azalmasına katkı sağlanabilecek ve önemli mineral bir kaynak olan kum kullanımı azalabilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. ve Jaturapitakkul, C. (2018). An investigation of bottom ash as a pozzolanic material. *Construction and Building Materials*, 186 (2018), 155–162.
- American Coal Ash Association. (2016). *Coal combustion product (CCP) & use survey report*, September 11, 2006. Erişim adresi: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/coal-combustion-products-use/2019-Survey-Results.pdf>
- Aruntaş, Y. H. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.
- Bras, A. ve Faustino, P. (2016). Repair mortars and new concretes with coal bottom and biomass ashes using rheological optimisation. *Journal Environmental Research*, 10(2), 203-216.
- Cherifa, M., Cavalcante Rochaa, V. ve Pérab, J. (1999). Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement and Concrete Research*, 29 (1999), 1387–1391.
- Environmental Protection Agency. (2018). Hazardous and solid waste management system; Disposal of coal combustion residuals from electric utilities. *Federal Register*, 83(51), 2018.
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Ghuan, T. C., Chin, A. B., Kuenzel, C. ve Ranjbar N. (2019). Safe disposal of coal bottom ash by solidification and stabilization techniques. *Construction and Building Materials*, 197(2019), 705–715.
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Djobo, J. N. Y., Tan, C. G., Ang, B. C., Ranjbar, N. (2018). Microstructural characterization and mechanical properties of bottom ash mortar. *Journal of Cleaner Production*, 170 (2018), 797-804.
- Ibrahim, A. H., Keong, C. K., Johari, M. A. M, Rashid, M. R. M. ve Ariffin, K.S. (2019). Influence of coal bottom ash on properties of portland cement mortar. *International Journal Of Integrated Engineering*, 11(2), 069–077.
- Indian Standarts. (1992). *Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity [CED 2: Cement and Concrete. (IS 13311-1)*. Erişim adresi <https://www.iitk.ac.in/ce/test/IS-codes/is.13311.2.1992.pdf>
- International Energy Agency (2011). World Energy Outlook. Erişim adresi <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2011>.

- Jun, N. H., Abdullah, M. M. A. B., Hussi, K., Jin, T. S. ve Omar, M. F.(2015). Review on the effect of bottom ash in performance of portland cement mortar. *Applied Mechanics and Materials*, 815, 164-169.
- Kaya, A. İ. (2010). *A study on blended bottom ash cements* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Kayan, Y., Ayhan, E. ve Doğruyol M. (2017). Mineral katkıların beton karışımında kullanılması. *Bilim ve Gençlik Dergisi*, 5(2), 2148-2273.
- Keskin, F. Ş. (2016). *Perlit ve taban külü katkılı harç özelliklerinin taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, Türkiye.
- Koçak, Y. (2011). Termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 135-140.
- Konak, S. (2018). *Granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü ince agregaları ile üretilmiş betonun gerilme şekil değiştirme davranışının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye.
- Klangvijit, W. ve Sookramoon, K. (2018, 06 August 2018). *Study of the Mix Cement Properties of Mortar Cement Used in Masonry and Plaster from the Waste Biscuit Firing of Ceramic*. MATEC Web of Conferences 187, 02005. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818702005>
- Luther, L. (2010). Managing coal combustion waste (ccw): issues with disposal and use. *Congressional Research Service*. Erişim adresi: <https://sgp.fas.org/crs/misc/R40544.pdf>
- Mohammed, S. A., Koting, S., Katman, H. Y. B., Babalghaith, A. M., Patah, M. A. P., Ibrahim, M. ve Karim, M. R. (2021). A Review of the Utilization of Coal Bottom Ash (CBA) in the Construction Industry. *Sustainability* 13, 8031.
- Oproiu, C.L., Voicu, G., Badanoiu, A. ve Nicoara, A.L. (2021). The solidification/stabilization of wastewater (from a landfill leachate) in specially designed binders based on coal ash. *Materials (Basel)*, 14(5610). Erişim adresi: <https://doi.org/10.3390/ma14195610>
- Piyarathne, R. ve Udamulla, K. (2016). *Use of Bottom Ash in Replacement of River Sand in Making Cement Mortar*. Erişim adresi: <https://www.semanticscholar.org>

- Prakash, K. ve Sridharan, A. (2009). Beneficial Properties of Coal Ashes and Effective Solid Waste Management. *Practice Periodical Of Hazardous, Toxic, And Radioactive Waste Management*, 13(4): 239-248.
- Ramzi, N. I. R., Shahidan, S., Maarof, M. Z. ve Ali, N. (2016, 24-25 Kasım). *Physical and chemical properties of coal bottom ash (cba) from tanjung bin power plant*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Melaka, Malezya. Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/160/1/012056/pdf>
- Reijnders, L. (2005). Disposal, uses and treatments of combustion ashes: A review. *Resources Conservation and Recycling*, 43(3):313-336.
- Rha, C. Y., Kang, S. K. ve Kim, C.E. (2000). Investigation of the stability of hardened slag paste for the stabilization/solidification of wastes containing heavy metal ions. *Journal of Hazardous Materials*, 8(73), 255-267.
- Sear, L. K. A. (2001). *Properties and use of coal fly as: A valuable industrial by-product(21)*. Thomas Telford Publishing.
- Sengupta, A. (2007). *Solidification and stabilization of contaminated soil* (Yüksek Lisans Tezi), University of New Orleans Theses and Dissertations, Hindistan.
- Sharma, S., Arora, V. V., Ojha, P. N., Singh, B. ve Patel, V. (2021). Use of bottom ash as part replacement of sand for making concrete blocks. *Journal of Building Materials and Structures*, 8(1), 82-92.
- Singh M. ve Siddique R. (2016). Effect Of Coal Bottom Ash As Partial Replacement Of Sand On Workability And Strength Properties Of Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 620-630.
- Singh M. ve Siddique R. (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Conservation and Recycling*, 72, 20-32.
- StateEase. (2021). Erişim Adresi <https://www.stateease.com/software/design-expert/>
- Sönnichsen, N. (2021). *Leading countries by coal consumption worldwide*. 10 Eylül 2021, Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/265510/countries-with-the-largest-coal-consumption/>
- Talınlı, İ. (2016). *Tehlikeli Atıkların Yönetimi*, İstanbul, Birsen Yayınevi.

- TEİAŞ, 2020. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Erişim adresi: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Tekin, İ. ve Tekin, D. (2018). Taban külü ikame edilmiş kompoze çimentolarda süper akışkanlaştırıcı etkisinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 21(1), 39-46.
- Kapakin, K. A. T. (2006). Scanning- Elektron Mikroskobu. *YÜ Vet Fakültesi Dergisi*, 17(1-2), 55-58.
- Tınmaz Köse E., Akyıldız A. ve Yıldız A., (2013). Recycling of coal ash as a building material via a stabilization/solidification method. *Global Nest Journal*, 15(4), 485-493.
- Tütünlü, F. ve Atalay, Ü.. (2001). *Utilization of fly ash in manufacturing of building bricks, international ash utilization symposium*. Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, USA.
- Türk Standartları. (2016). *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*. (TS EN 196-1-2016). Standart ara.
- Türk Standartları. (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar bileşim özellikler ve uygunluk kriterleri*. (TS EN 197-1). Standart ara.
- Türk Standartları. (2000). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*. (TS EN 1015-3). Standart ara.
- Türk Standartları. (2021). *Beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*. (TS EN 12504-4). Standart ara.
- Türk Standartları. (2006). *Uçucu kül -Betonda kullanılan -Tarifler, özellikler ve kalite kontrol*. (TS EN 450-1). Standart ara.
- Türk Standartları. (2002). *Atıkların nitelendirilmesi - Katıdan özütleme analizi- Granül katı atıkların ve çamurların katı özütlemesi için uygunluk deneyi -Bölüm 4 :Sıvı katı oranı*. (TS-EN 12457-4). Standart ara.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, “Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes”, pp. 2-4, Nisan.
- Yüksel, i., Bilirb, T. ve Özkan, Ö. (2006). Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. *Building and Environment*, 42(2007) 2651–2659.

Zhang, X. (2014). Management of coal combustion waste. IEA Clean Coal Centre. Erişim adresi:https://usea.org/sites/default/files/012014_Management%20of%20coal%20Combustion%20wastes_ccc231.pdf

