
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

LİF KATKILI ÇİMENTO KOMPOZİTLERDE ATIK CAM KULLANIMININ ETKİSİ

Koray KAYSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Koray KAYSİ

11/07/2024

LİF KATKILI ÇİMENTO KOMPOZİTLERDE ATIK CAM KULLANIMININ ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Koray KAYSİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Bu çalışmada atık kağıt hamurunun lif kaynağı olarak ve atık camın agrega olarak kullanılmasının çimentolu kompozit levha özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çimento kompozit levha üretim sürecindeki büyük miktarda agrega tüketimi ve düşük kalite gereklilikleri, inşaat endüstrisini atık camın çevresel yükünü çözmenin en umut verici yollarından biri haline getirmektedir. Atık kağıt hamuru kullanımıyla ise orman kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılması öngörülmektedir. Çalışmalarda, atık kağıt hamuru ham selüloza sırasıyla %10; %20; %30; %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiştir. Atık kağıt hamuru ikame oranı arttıkça eğilme dayanımı, su emme oranı ve gözeneklilik değerleri %42,3; %10,8 ve %8,7 oranlarına varan düşüş gösterirken yoğunluk değerinde ise %2,4'e varan artış görülmüştür. Atık cam agregası eldesi aşamasında ise atık camın bilyalı değirmende öğütülmesi ve sonraki süreçte elenmesiyle dört farklı partikül boyutunda (0-38; 38-63; 63-90 ve 90-212 μm) atık cam elde edilmiştir. Çimento kompozit levha üretiminde ilk aşamada tüm partikül boyutları için agregaya ağırlıkça %10; %20 ve %50 oranında atık cam ikame edilmiştir. Çimentolu kompozit levha numuneleri üzerinde TS EN 12467 standardına uygun olarak eğilme mukavemeti, su emme oranı, açık gözeneklilik ve yoğunluk testleri yapılmıştır. Optimum partikül boyutu aralığının tespit edilmesi için istatistiksel analiz çalışması yapılmıştır. En iyi sonuç 0-38 μm partikül boyutu aralığında %20 oranına kadar atık cam içeren numunelerden elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında agrega içerisine %4 aralıklarla %20'ye kadar 0-38 μm atık cam ikame edilmiştir. Optimum sonuçlar %8 atık cam ikamesinden elde edilmiştir. Eğilme mukavemeti, yoğunluk, su emme oranı ve açık gözeneklilik değerleri sırasıyla 6,39 N/mm^2; 1416 kg/m^3; %26,37 ve %36,94 olarak bulunmuştur. Eğilme mukavemeti, su emme oranı ve açık gözeneklilik değerleri kontrol numunesine göre sırasıyla %5,1; %4,8 ve %2,6 artarken yoğunluk değeri %1,2 azalmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçlarına göre ise, atık cam kullanımının çimento kompozit levha üretim sürecinin çevresel etkisini beklendiği gibi %2,7 oranında azalttığı görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91204
Anahtar Kelimeler	:	Atık cam, çimento kompozit levha, sürdürülebilirlik, geri dönüşüm
Sayfa Adedi	:	93
Danışman	:	Prof. Dr. Nuray OKTAR
İkinci Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Birce PEKMEZCİ KARAMAN

IMPACT OF INCORPORATING WASTE GLASS IN FIBER REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Koray KAYSİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

In this study, the effect of using waste paper pulp as a fiber source and waste glass (WG) as aggregate on cement composite board properties was investigated. The large consumption of aggregates in the cement composite board production process and the low quality requirements make the construction industry one of the most promising ways of solving the environmental burden of WG. The use of waste paper pulp is expected to reduce the dependency on forest resources. In the studies, waste paper pulp was substituted for raw cellulose at the rates of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%, respectively. As the waste paper pulp substitution rate increased, the bending strength, water absorption rate and porosity values decreased by up to 42.3%, 10.8% and 8.7%, while the density value increased by up to 2.4%. In the waste glass aggregate production stage, waste glass was ground in a ball mill and sieved in the following process to obtain waste glass in four different particle sizes (0-38, 38-63, 63-90 and 90-212 μm). In the first stage of cement composite board production, 10%; 20% and 50% waste glass was substituted by weight into the aggregate for all particle sizes. Flexural strength, water absorption (WA), open porosity and dry apparent density tests were carried out on the cement composite board samples in accordance with the TS EN 12467 standard. Statistical analysis study was conducted to determine the optimum particle size range. The best result was obtained from samples containing up to 20% waste glass in the 0-38 μm particle size range. In the second stage of the study, 0-38 μm WG was substituted into aggregate up to 20% at 4% intervals. The optimum results were obtained from %8 WG substitution. Flexural strength, density, WA and open porosity values were found to be 6.39 N/mm^2; 1416 kg/m^3; 26.37% and 36.94% respectively. While the flexural strength, WA and open porosity values increased by 5.1%; 4.8% and 2.6%, respectively, compared to the control sample, density value decreased by 1.2%. According to the life cycle assessment results, it was seen that the use of waste glass reduced the environmental impact of the cement composite board production process by 2.7%, as expected.

Science Code	:	91204
Key Words	:	Waste glass, cement composite, sustainability, recycling
Page Number	:	93
Supervisor	:	Prof. Dr. Nuray OKTAR
Co-Supervisor	:	Asst. Prof. Birce PEKMEZCİ KARAMAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca beni yönlendiren, sabrını ve bilgisini esirgemeyip bu süreçte desteği ile beni motive eden kıymetli danışmanım Prof. Dr. Nuray OKTAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli bilgileri ve enerjisi ile bana yol gösteren ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Birce PEKMEZCİ KARAMAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans yapmam için beni teşvik eden ve desteğini esirgemeyen Sayın Sibel HACIOĞLU'na, çalışmada karşılaştığım her sorunumda yüksek enerjisi ve desteği ile daima yanımda olan Dr. Ceren Serap AKIN'a, laboratuvar çalışmalarım boyunca yardımda bulunmaktan geri durmayan Fatih DEMİR'e ve Tepe Ar-Ge Merkezi'nin tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, yüksek lisans yolculuğum boyunca gösterdikleri sabır, sevgi ve destek ile bu süreci daha anlamlı ve katlanılabilir kılan, hayatta sahip olduğum en büyük güç kaynağım olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmaya sağladıkları destekten dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje Kodu: FYL-2023-8649) teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Çimento Kompozit Levha 5

2.2. Çimento Kompozit Levha Üretiminde Kullanılan Ham Maddeler 6

2.2.1. Çimento 6

2.2.2. Lif 11

2.2.3. Agrega 12

2.3. Çimento Kompozit Levha Üretiminde Sürdürülebilirlik 14

2.4. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 16

2.5. Atık Camın Agrega Olarak Kullanılması ile İlgili Önceki Çalışmalar 19

3. MATERYAL ve METOT 29

3.1. Kullanılan Ham Maddeler 29

3.1.1. Çimento 29

3.1.2. Uçucu kül 30

3.1.3. Selüloz 30

Sayfa

3.1.4. Silis kumu 30

3.1.5. Atık kağıt hamuru 31

3.1.6. Atık cam 31

3.2. Atık Cam Agregası Hazırlama 31

3.3. Atık Cam Agregası Karakterizasyonu 33

3.4. Çimento Kompozit Levha Numunesi Üretimi 35

3.5. Çimento Kompozit Levhalara Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler 37

3.6. Çimento Kompozit Levhalara Uygulanan Karakterizasyon Çalışması 39

3.7. İstatistiksel Analiz 39

3.8. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 40

4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA 41

4.1. İlk Aşamada Üretilen Levhaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 41

4.2. İstatistiksel Analiz 49

4.3. İkinci Aşamada Üretilen Levhaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 51

4.4. Çimento Kompozit Levhaların SEM Karakterizasyonu 54

4.5. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 56

5. SONUÇ ve ÖNERİLER 61

KAYNAKLAR 63

EKLER 73

EK-1. Atık cam öğütme işlemine ait bilyalı değirmen kalibrasyon değerleri 74

EK-2. İlk aşamada atık kağıt hamuru ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 74

EK-3. İlk aşamada atık kağıt hamuru ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri 75

EK-4. İlk aşamada üretilen kontrol levhalarının eğilme dayanımı değerleri 76

EK-5. İlk aşamada A sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 77

Sayfa

EK-6. İlk aşamada B sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 78

EK-7. İlk aşamada C sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 79

EK-8. İlk aşamada D sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 80

EK-9. İlk aşamada üretilen kontrol levhalarının su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri..... 81

EK-10. İlk aşamada A sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri..... 82

EK-11. İlk aşamada B sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri..... 83

EK-12. İlk aşamada C sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri..... 84

EK-13. İlk aşamada D sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri..... 85

EK-14. İkinci aşamada üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri 86

EK-15. İkinci aşamada üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri 87

EK-16. Kontrol senaryosu için hesaplanan YDD verileri..... 88

EK-17. A20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri 89

EK-18. B20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri 90

EK-19. C20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri 91

EK-20. D20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri 92

ÖZGEÇMİŞ 93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. TS EN 197-1 standardına göre çimento sınıfları 7

Çizelge 2.2. Portland çimentosu ana bileşenleri 7

Çizelge 2.3. Çimento kimyasında kullanılan oksit sembolleri 8

Çizelge 2.4. Çimentonun ana bileşenlerinin kısaltılmış kimyasal gösterimi 8

Çizelge 2.5. Beton üretiminde yaygın olarak kullanılan agregalar 13

Çizelge 2.6. İnşaat malzemelerinde kullanılan atık malzeme türleri 14

Çizelge 3.1. Çimento kompozit levha üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri 29

Çizelge 3.2. Numune üretiminde kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri 30

Çizelge 3.3. Atık cam agregası partikül boyut dağılımı 34

Çizelge 3.4. Atık cam agregası kimyasal kompozisyonu 35

Çizelge 3.5. Atık kağıt hamuru reçeteleri 37

Çizelge 3.6. Atık cam agregası reçeteleri 37

Çizelge 4.1. Atık kağıt hamuru reçeterine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri 42

Çizelge 4.2. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri 43

Çizelge 4.3. İlk aşama atık cam reçelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri 45

Çizelge 4.4. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri 46

Çizelge 4.5. Numunelerin eğilme dayanımını etkileyen varyans analizi sonucu 49

Çizelge 4.6. Farklı partikül boyut aralığı ve ikame oranındaki cam ile üretilen levhalara ait ortalama eğilme dayanım değerleri 50

Çizelge 4.7. İkinci aşama reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri 51

Çizelge 4.8. İkinci aşama reçetelerine ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri 52

Çizelge 4.9. Oluşturulan senaryolar için yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları 57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Selüloz liflerinin kimyasal yapısı 12

Şekil 2.2. YDD'nin yinelemeli aşamaları..... 17

Şekil 2.3. YDD sistem sınırları ve aşamalar arasındaki bağlantılar 18

Şekil 3.1. Silis kumu elek analizi sonuçları 31

Şekil 3.2. Atık cam agregası hazırlama işlemleri 33

Şekil 3.3. Atık cam agregası elek analizi deneyi sonuçları..... 34

Şekil 3.4. Çimento kompozit levha üretim aşamaları 35

Şekil 3.5. Fiziksel ve mekanik test aşamaları 38

Şekil 4.1. Atık kağıt hamuru reçeterine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri 42

Şekil 4.2. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri..... 43

Şekil 4.3. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri 43

Şekil 4.4. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri..... 44

Şekil 4.5. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri..... 45

Şekil 4.6. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri..... 47

Şekil 4.7. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri 47

Şekil 4.8. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri..... 48

Şekil 4.9. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri... 51

Şekil 4.10. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri.... 52

Şekil 4.11. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri 53

Şekil 4.12. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri 53

Şekil 4.13. Çimento kompozit levhaların beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesi küresel ısınma potansiyeli değerleri..... 58

Şekil 4.14. Çimento kompozit levhaların beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesi kümülatif enerji ihtiyacı değerleri..... 59

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Örnek çimento kompozit levha görseli 5

Resim 2.2. ASR jeli genleşmesi nedeniyle çatlayan duvar örnekleri 10

Resim 3.1. Yıkama işleminden geçirilip kırılmış meşrubat şişeleri (a), kırılmış atık cam numunesi (b) 32

Resim 3.2. Öğütülmeye hazır atık cam kırıkları (a), değirmen içerisindeki bilyalar (b), bilyalı değirmen (c) ve öğütülmüş atık cam numunesi (d) 32

Resim 3.3. Islak eleme işlemi (a) ve etüve konulmaya hazır atık cam numunesi (b)..... 33

Resim 3.4. Atık cam numuneleri; (a) 0-38 μm, (b) 38-63 μm, (c) 63-90 μm, (d) 90-212 μm 34

Resim 4.1. Üretilen çimento kompozit levhalar 41

Resim 4.2. Numunelerin SEM görüntüleri, (a) Kontrol, (b) AC-A-10, (c) AC-B-10, (d) AC-C-10, (e) AC-D-10, (f) AC-A-8 55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış semboller ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Semboller	**Açıklamalar**
b	Numune genişliği (mm)
e	Numune kalınlığı (mm)
F	Kırılma yükü (N)
I_S	Mesnet düşey eksenleri arasındaki açıklık (mm)
m_A	Nemi sıfırlanmış levha ağırlığı (g)
m_B	24 saat suda bekletilmiş levhanın ağırlığı (g)
m_C	Levhanın Arşimet terazisindeki ağırlığı (g)
S_k	Seüloz hamuru konsantrasyonu (%)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
µm	Mikrometre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASR	Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
EN	European Norm
ISO	Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı
LSD	Asgari Önemli Fark
MOR	Eğilme dayanımı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SR	Schopper-Riegler
TS	Türk Standardı
WA	Su emme
WG	Atık cam
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

1. GİRİŞ

Günümüzde gittikçe artan kentleşme ve sanayileşme nedeniyle atık üretimi dünya çapında artmaktadır. Söz konusu kentleşme ve sanayileşme nedeniyle büyük miktarlarda atık ürün elde edilmektedir. Küresel atık üretiminin 2016 yılı verilerine göre 2050 yılında neredeyse iki katına, 2100 yılında ise üç katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Atık ürünler, üretim ve bertaraf sırasında ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır [1]. Düzenli depolama ve yakma gibi uygun olmayan atık bertaraf uygulamaları toprağı, suyu ve havayı kirletmekte ve sera gazları yaymaktadır. Bu atıkların çoğu tehlikeli, yanıcı, kimyasal olarak reaktif, yakıcı ve bulaşıcı olup, düzenli depolama alanlarına boşaltılması ciddi mali kayıplara neden olmaktadır. Dünyadaki katı atıkların küresel karbon emisyonunun %5'inden sorumlu olduğu ve bunların yakılmasının bu rakamı daha da artırdığı belirtilmektedir. Atık miktarının artmaya devam etmesi nedeniyle atık yönetimi konusu uluslararası alanda ilgi görmeye başlamıştır. İyileştirilmiş bir atık yönetim sisteminin, küresel CO_2 emisyonlarını %15'e kadar azaltabileceği düşünülmektedir. Geleneksel atık imha/yönetim programları, Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasını kısıtlayan ciddi çevresel, ekonomik ve sosyal kaygılara sebep olmaktadır [1-4].

Kaynak verimliliğinin artırılması ve atık çıktısının azaltılmasına ihtiyaç duyulduğundan sürdürülebilir kalkınma giderek daha önemli hale gelmektedir. Sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerini tehlikeye atmadan mevcut talepleri karşılamaya çalışmaktadır. Doğal kaynakların tüketimi çok hızlı bir şekilde artmakta ve yol açtığı sorunlar acil aksiyon gerektirmektedir. Güvenli ve temiz ekolojik ortamlar, sürdürülebilirlik, gelişmiş ekonomi ve doğal kaynakların verimli kullanımı, atık yan ürünlerin düzenli, etkili ve çevre dostu yönetimini gerektirmektedir [4-6].

Atık malzemelerin üretimde değerlendirilmesi, sürdürülebilir bir döngü oluşturarak ve ham madde talebini azaltarak doğal kaynakların daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu durum, doğal kaynaklara bağlı faaliyetlerin negatif etkilerini minimize etmektedir. Atık malzemelerin üretimde değerlendirilmesi aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamaktadır; örneğin, metal, cam ve kağıt gibi malzemelerin geri dönüşümü, bu malzemelerin orijinal üretiminden çok daha az enerji gerektirmektedir. Bu durum, ekonomik

açıdan da avantajlıdır, çünkü geri dönüştürülen malzemeler genellikle daha düşük maliyetle temin edilmektedir [7-9].

İnşaat ve yapı malzemeleri sektörü hızla büyümektedir. Bu durum, yüksek miktarlarda çimento tüketimine ve beton üretimine yol açmaktadır. Bu nedenle, çimento ve beton dünya genelinde en yaygın kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Beton hacminin yarıdan fazlası agregalar tarafından oluşturulmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde, agregalar doğal kayalardan ve nehir kumlarından elde edilmekte ve bu durum, kıyı habitatlarının, ormanlık alanların ve nehir yataklarının ekolojisini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, doğal agrega arzı gün geçtikçe azalmaktadır. Buna ek olarak yapı malzemeleri üretiminde lifler de kullanılmaktadır. Proseste ham selüloz kullanımı, orman kaynaklarının hızla tüketilmesine yol açmaktadır. Bu riskler, hükümetleri, sanayi kuruluşlarını ve araştırma kurumlarını bu sektörün sürdürülebilirliğini incelemeye motive etmektedir. Bunun sonucunda, doğal agrega ve lif kullanmadan üretim veya yan ürünleri ve atık malzemeleri ham maddeler yerine kullanmak gibi çeşitli yöntemler önerilmektedir. Sonuç olarak, dünya sürdürülebilir bir geleceğe doğru yol almaya çalışırken, atıkların ve endüstriyel yan ürünlerin çimento bazlı ürünlerdeki agregaların yerine kullanılması, doğal kaynakların güvence altına alınması, çevrenin korunması, enerji tasarrufu ve atık depolama alanlarının azaltılması açısından uygulanabilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır [10-21].

Cam, silika mineralinin eritilip ardından hızlı bir şekilde soğutulmasıyla oluşturulan saydam ve sert bir malzemedir. Camın özellikleri, kullanılan malzemelerin oranları, üretim süreci ve işlenme yöntemlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Şeffaf yapısı sayesinde ışığın geçmesine olanak tanımakta ve bu özelliği birçok farklı endüstride çeşitli uygulamalara olanak sağlamaktadır [22]. Dayanıklılığı, kimyasal direnci ve estetik özellikleri nedeniyle inşaat, otomotiv, elektronik, ambalaj ve sanat gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle cam, dünya çapında büyük miktarlarda kullanılan ve genellikle tek kullanım sonrası atık sahalarına atılan çok yönlü bir malzemedir [23-25].

Atık camın geri dönüştürülmesi, çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra doğal kaynakları koruma ve ekonomik faydaları beraberinde getirerek sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Teorik olarak tamamen geri dönüştürülebilse de atık camın üretimde kullanılabilmesi için kalite kriterlerini karşılama açısından hala sınırlamalar mevcuttur. Bu nedenle, geri dönüştürülemeyen kısım genellikle atık sahalarında

depolanmaktadır [26-28]. 2022 yılı verilerine göre, global çapta yaklaşık 209 milyon ton cam üretilmiştir. Bu sayıya cam elyaf üretimi, özel camlar ve yan sanayiler dahil değildir [29]. Avrupa'da ve ülkemizde kullanılan camların sırasıyla yaklaşık %79'u ve %14'ü geri dönüşüm için toplanmaktadır [30]. Dünya çapında atık camların ortalama geri dönüşüm oranı ise %35 olarak belirlenmiştir [31]. Türkiye'de atık cam toplama oranının %14 olması nedeniyle geri dönüşüm oranının da oldukça düşük seviyelerde olduğu düşünülebilir.

Büyük miktarlarda ihtiyaç duyulması, düşük kalite gereklilikleri ve geniş inşaat alanlarının olması, inşaat endüstrisini atık camın çevresel etkisini çözmenin en çekici yollarından biri haline getirmektedir [28]. Atık camın inşaat endüstrisinde kullanılarak geri dönüştürülmesi, yalnızca atık sahalarındaki yükü azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kaynakların korunmasına ve karbon ayak izinin azaltılmasına da önemli ölçüde katkıda bulunur [26, 32, 33].

Kağıt hamuru, kağıt ve kağıt karton üretim ve işlenmesinden kaynaklanan atıklar (atık kağıt hamuru), 03 03 atık kodu altında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından düzenlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Bu atıkların yapı malzemeleri üretiminde kullanılmakta olan ham selüloz yerine belirli oranlarda kullanılması son yıllarda birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Araştırmalar sonucu atık kağıt hamuru kullanım oranı arttıkça eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yoğunluk değerleri düşüş gösterirken, su emme oranı ise artmıştır. Çalışmalarda ortak bir sonuca rastlanamamış olup analiz sonuçları kullanılan atık kağıt hamuruna göre değişmiştir [22-25].

Geçtiğimiz yıllarda pek çok araştırmacı çimento karışımlarında agrega olarak kullanılan kum yerine atık cam kullanılmasını araştırmıştır. Araştırmacılar, atık camın dahil edilmesinden dolayı mekanik özellikler üzerinde değişken sonuçlar bulmuşlardır. Yapılan analizlerde numunelerin eğilme dayanımı açısından farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bir grup, atık camın agregaya ikame oranı arttıkça eğilme dayanımının azaldığını gösterirken [34-39], diğer grup ise eğilme dayanımının atık cam ikame oranı arttıkça artacağını belirtmiştir [40-44]. Numunelerin yoğunlukları incelendiğinde sonuçlar yine farklılık göstermiştir. Bazı çalışmalar ikame oranının yoğunluğu etkilemediğini ileri sürerken [39-40, 42, 44-47], diğer çalışmalar ise, ikame oranı arttıkça ve parçacık boyutu azaldıkça yoğunluğun azaldığını göstermektedir [38, 43, 48-49]. Literatürdeki çalışmalarda levhaların su emme oranı yoğunlukla ters yönde değişmektedir [39, 46, 49]. Atık camlar daha önce yapılan çalışmalarda beton harcı içerisinde kullanılmıştır fakat çimento kompozit levha üretimi

çalışmalarında parçacık boyutuna ve ikame oranına göre etkisi incelenmemiştir. Literatür araştırmaları doğrultusunda camın betonda ve çimento kompozit levhalarda alkali-silika reaksiyonuna sebep olduğu bilinmektedir [46-48]. Ancak camın partikül boyutu 100 mikrondan daha düşük seviyelere geldiği zaman puzolanik reaksiyonun baskınlığının arttığı da belirtilmektedir [28, 31, 50-55]. Çalışmalar partikül boyutuna göre değişmekle beraber, atık camın beton harcında, özellikleri negatif yönde etkilemeden, agreganın %20 - %30 oranında yerini alabildiğini göstermektedir [26, 28, 32].

Çalışmanın temel amacı çimento kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini negatif yönlü etkilemeden atık kağıt hamurunun ham selüloz yerine ve atık camın kum yerine ikame edilmesi ve optimum parametrelerin belirlenmesidir. Bu nedenle karışımda agrega olarak kullanılan silis kumu yerine çeşitli partikül boyutu ve ikame oranlarında atık cam kullanılarak numuneler üretilmiş ve fiziksel-kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında atık camlar birkaç farklı partikül boyutu aralıklarına getirilmiş (0-38 μm, 38-63 μm, 63-90 μm ve 90-212 μm) ve harçlara farklı oranlarda (%10, %20 ve %50) eklenerek ürünün eğilme dayanımı, su emme oranı, kuru görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında ise 0-38 μm aralığının optimum partikül boyutu seviyesi ve %20 oranının optimum ikame oranı olarak tespit edilmesi sonucu, 0-38 μm boyut aralığındaki atık camlar %20 ikame oranının alt kırınımlarını inceleyebilmek için farklı agrega ikame oranlarında (%4, %8, %12 ve %16) harçlara eklenmiş ve levhaların eğilme dayanımı, su emme oranı, kuru görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik özellikleri analiz edilmiştir. Ardından SEM analizi ile levhaların yüzey morfolojisi incelenerek yorumlanmıştır. Son olarak da ilgili numunelerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışması yürütülüp ilgili sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın özgün özelliği, atık camın çimento kompozit malzemelerde farklı parçacık boyutlarında ve agrega ikame oranlarında kullanımını ve özelliklere etkisini literatürde ilk araştıran çalışma olmasıdır. Bu sayede atık camlar yapı malzemelerinde değerlendirilerek çevre kirliliğinin önüne geçilecek ve aynı zamanda ulusal ve döngüsel ekonomik kazanç elde edilecektir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlardan 6th International Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2023)'da "Impact of Incorporating Waste Glass in Cement-Based Composite Boards" başlıklı bildiri yayımlanmıştır. Ek olarak, çalışma sonucu elde edilen sonuçlardan SCI indeksli dergilerde bir makalenin yayınlanması planlanmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde ilk olarak çimento kompozit levha hakkında genel bilgiler verilmiştir. Genel bilginin ardından çimento kompozit levha için kullanılan ham maddelerin özellikleri, etkileri, etkileşimleri/reaksiyonları anlatılmıştır. Son olarak da sürdürülebilirlik ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) konularından bahsedilmiştir.

2.1. Çimento Kompozit Levha

Beton, düşük çekme dayanımı ve gerinim yeteneğinin yanı sıra kırılgan bir yapıya da sahiptir. Kısa, süreksiz liflerin kullanımı betonu güçlendirmekte ve sertleştirmektedir. Lifler, tarih öncesi çağlardan beri yapı malzemelerinde kullanılmaktadır. Tarihsel bakımdan çimento kompozit levhalara ilk örnek Eski Mısırlıların tuğla oluşturmak için saman liflerini çamura dahil etmesi olarak verilebilir [56]. Örnek bir çimento kompozit levha görseli Resim 2.1'de sunulmuştur.



Resim 2.1. Örnek çimento kompozit levha görseli [57]

Çimentolu malzemeleri güçlendirmek için liflerin kullanımı, Çek mühendis Ludwik Hatschek'in icat edip kendi adını verdiği Hatschek Prosesi'nin asbestli çimento üretimine izin verdiği yaklaşık 1900 yılına kadar uzanmaktadır. Çimento kompozit levhalar, çimento, agrega ve liflerin benzersiz bir kombinasyonundan oluşan, yüksek mukavemet, esneklik, darbe direnci, yangına ve hava koşullarına dayanıklılık özelliklerine sahip kompozit bir yapı malzemesidir. 100 yılı aşkın süredir kontrplak veya yönlendirilmiş yonga levha (*oriented strand board*) gibi doğal ahşap ve ahşap bazlı ürünlerin yerine kullanılmaktadır. Çimento kompozit levhalar, hem yeni inşa edilen hem de yenilenen binalarda havalandırmalı cephe kaplaması, iç duvar kaplamaları, balkon korkuluk panelleri, taban döşemesi, baca kaplaması

ve mahfaza alt kaplaması olarak kullanılmaktadır. Cilalanmamış, boyalı veya sadece emprenye edilmiş yüzeylere de uygulanabilirler. Çimento kompozit levha, beton ile karşılaştırıldığında, daha yüksek performansta tokluk, süneklik, eğilme dayanımı ve çatlama direnci özellikleri göstermektedir. Elyaf takviyesinin en önemli avantajı, liflerin matris çatlağını köprülemesi nedeniyle, kompozitin çatlama başladıktan sonraki davranışına olan olumlu etkisidir. Bu süreçte stres, yüke dayanabilen yüksek dirençli lif sistemine aktarılır. Çatlama sonrası tokluk özelliği nedeniyle, çimento kompozit levhalar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, lifler yapı içindeki istenmeyen serbest plastik büzülmeyi ve ısıl iletkenliği azaltabilir, akustik yalıtımı ve yangına dayanıklılığı geliştirebilir [58-59]. Çeliğin yanı sıra, çimento kompozit levhalar tüm yapı malzemeleri arasında en yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. Çürümez, eğilmez, çatlamaz ve %100 geri dönüştürülebilme özelliklerine sahiptirler. Ayrıca termitlere, mantarlara ve organizmalara karşı dirençlidirler. Nem hareketi ile genleşme veya büzülme şeklindeki boyutsal kararlılıkları da tercih edilme nedenleri arasındadır [60]. Dünya çapında çimento kompozit levha üretiminin 2024 yılı sonuna kadar 38,2 milyon tona ulaşması beklenmektedir [58].

2.2. Çimento Kompozit Levha Üretiminde Kullanılan Ham Maddeler

Çimento kompozit levhalar, çimento, lif ve agreganın benzersiz bir kombinasyonundan oluşan, yüksek dayanım, esneklik, darbe direnci, yangına ve hava koşullarına dayanıklılık özelliklerine sahip kompozit bir yapı malzemesidir [58].

2.2.1. Çimento

Günümüzde dünyanın hemen her ülkesinde çok çeşitli çimentolar üretilmektedir. Başta kil ve kireçtaşı olmak üzere ham maddeler belirli oranlarda karıştırılarak ve yaklaşık 1450°C'ye ısıtılarak kalsiyum silikatlar ve alüminatlardan oluşan, klinker adı verilen bir ürün oluşturulmaktadır. Bu ürün, Portland çimentosunu üretmek için alçıtaşı ile ince bir şekilde öğütülmektedir. Çimentolu malzemelerin veya minerallerin klinkerin kısmi ikamesi olarak veya çimentoya katkı olarak kullanılması ile “harmanlanmış çimentolar” üretilir. Mevcut teknoloji ve bilgi birikimi, istatistiksel olarak homojen ve tekrarlanabilir bileşime sahip çimentoların üretilmesini sağlamaktadır [62-64].

Avrupa Birliği'nde, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN), çimentoların ve bileşenlerinin uyması gereken uygunluk, bileşim ve gereklilik (mekanik, fiziksel, kimyasal ve dayanıklılık) kriterlerini belirten EN 197-1 standardını yayınlamıştır. Bu standarda uyan çimentolar CEM olarak kısaltılan "yaygın çimentolar" olarak adlandırılır, bileşime ve dayanıma göre sınıflandırılır. Bileşime göre olan sınıflar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Dayanıma göre ise 32,5; 42,5 ve 52,5 olmak üzere 3 sınıf vardır. Bu değerler TS EN 196-1'e göre belirlenen ve MPa olarak ifade edilen 28 günlük basınç dayanımları ile ilişkilidir [62].

Çizelge 2.1. TS EN 197-1 standardına göre çimento sınıfları [65]

Çimento Tipleri		Kütlece Bileşen Oranı, %	
		Klinker	Diğer Ana Bileşenler
Portland çimentosu	CEM I	95-100	-
Portland – kompoze çimento	CEM II	65-94	Yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kalker, uçucu kül
Yüksek fırın cüruflu çimento	CEM III	5-64	Yüksek fırın cürufu
Puzolanik çimento	CEM IV	45-89	Uçucu kül, silis dumanı
Kompoze çimento	CEM V	20-64	Yüksek fırın cürufu, uçucu kül

Çizelge 2.2'de Portland çimentosunun beş ana kimyasal bileşiğini ve bunların ağırlıkça ortalama yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Portland çimentosu ana bileşenleri [62-64, 66]

Bileşen	Oranı
Trikalsiyum silikat	%50
Dikalsiyum silikat	%25
Trikalsiyum alüminat	%10
Tetrakalsiyum alüminoferrit	%10
Alçıtaşı	%5

Çimento bazlı malzemeler, kimyasal-minerolojik bileşim açısından oldukça heterojen olan karmaşık bir mikroyapısal organizasyona sahiptir. Bu nedenle, çimento kimyası alanında bileşikler, kimyasal formüllerin isimlendirmesinden farklı olarak basitleştirilmiş bir gösterimle anılır [62, 65]:

- Kimyasal elementler oksit formları cinsinden ifade edilir.
- Oksitler kimyasal formüllerinin ilk harfiyle temsil edilir.
- Bileşikte oksitlerin mevcut olduğu oran indeksle yazılır.

Ancak notasyonun, oksitlerin yapıda ayrı bir varlığı olduğu, yani kimyasal bir anlamı olmadığı anlamına gelmediğini belirtmek gerekmektedir. Çimentonun bileşenlerin oksitlerle olan kimyasal bileşiklerinin sembolleri Çizelge 2.3'te verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 2.4'te çimentonun ana bileşenlerinin kısaltılmış kimyasal gösterimi sunulmuştur.

Çizelge 2.3. Çimento kimyasında kullanılan oksit sembolleri [62, 65]

Oksit	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	CO_2	H_2O
Sembol	C	S	A	F	M	N	K	$\bar{S}$	$\bar{C}$	H

Çizelge 2.4. Çimentonun ana bileşenlerinin kısaltılmış kimyasal gösterimi [62-65]

Bileşen Adı	Kimyasal Açılımı	Kısaltması
Trikalsiyum silikat	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Dikalsiyum silikat	$2Cao.SiO_2$	C_2S
Trikalsiyum alüminat	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF
Kalsiyum Hidroksit	$Ca(OH)_2$	CH
Kalsiyum Sülfat	$CaSO_4$	$C\bar{S}$
Alçıtaşı	$CaSO_4.2H_2O$	$C\bar{S}H_2$
Hidratlı kalsiyum silikatlar (değişken kimyasal bileşime sahiptir)	$xCaO.SiO_2.yH_2O$	C-S-H

Betondaki hidratasyon süreci, çimento bileşiklerinin su ile kimyasal reaksiyona girerek stabil ve amorf bir katı hidrat fazı üretmesini içerir. Bu katı faz, suyun varlığında genişlemeye devam eder ve hidrat katı matrisi içindeki diğer malzemeleri jel yapısı sayesinde bir şekilde kapsüller. Bu bileşenlerin reaksiyonları farklı hızlarda meydana gelir ve birbirlerini karşılıklı olarak etkileyerek sistemde kimyasal, fiziksel ve mekanik

değişikliklere yol açar. Hidratlanmış bileşikler birbirine bağlanarak çimentoya adhezif ve kohezif özellikler kazandırır. Makroskobik ölçekte hidratasyon süreci su-çimento sisteminin katı bir matrise dönüşmesine yol açar. Bu matris mikroskobik olarak düzensizdir, gözeneklidir ve çimento esaslı malzemelerde bağlayıcı görevi görür. Çimento hidratasyon reaksiyonu mekanizması karmaşıktır ve hala tam olarak anlaşılamamıştır [62-64].

Çimentodaki kimyasal reaksiyonlar, suyu kalsiyum (Ca^{2+}) ve hidroksit (OH^-) iyonlarıyla doyurur. Negatif hidroksit iyonları, çimento hamurunun alkalinitesini yükselterek (pH>12) etkili bir şekilde aşındırıcı bir madde oluşturur. Su, kalsiyum ve hidroksit iyonları ile doygun hale geldiğinde, katı kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silika hidrat katıları oluşur ve çözeltiden gözenek boşluklarına çökelir. Bu işlem aynı zamanda ısı da üretir. Suyla karıştırıldığında dikalsiyum ve trikalsiyum silikatlar için son ürünler aynıdır. Trikalsiyum silikatların sudaki hızlı reaksiyonu, dikalsiyum silikatların sudaki daha yavaş reaksiyonundan daha fazla ısı üretir; ancak her iki reaksiyonda da kalsiyum hidroksit ve kalsiyum-silikat-hidrat molekülleri ve ısı üretilir. Bu iki ana bileşenin hidratasyon reaksiyonları Eş. 2.1 ve Eş. 2.2'de verilmiştir [67]. Bu nedenle, çimento için bileşenlerin seçimini belirleyen temel faktör, bunların hidratlanma hızıdır. Bu bileşiklerin harmanlanmasıyla, belirli bir kullanım için optimum sertleşme hızı ve nihai mukavemet ampirik olarak belirlenebilir [62-64].

$$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad \Delta H^o_{298} = -500\ kJ/kg \qquad (2.1)$$

$$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad \Delta H^o_{298} = -250\ kJ/kg \qquad (2.2)$$

Çimentonun hidratasyon reaksiyonu dışında girdiği iki reaksiyon daha mevcuttur. Bunlar alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve puzolanik aktivitedir. İyi bir karışım için agregaların inert olması gerekir. Bununla birlikte, bazı agregalar alkali ortamlarda reaksiyon gösterir. Reaktif agregalarda bulunan amorf silika ile malzeme gözeneklerinde bulunan çözeltinin içerisindeki sodyum ve potasyum gibi alkali bileşenleri arasında meydana gelen ve oldukça zararlı bir süreç olan alkali silika reaksiyonu (ASR) da görülür. ASR, Eş. 2.3'te verilmiştir. Hidratlanmış bir ASR jeli, suyu emebilen ve sistemde yeterli reaktif silika, alkali içeriği ve nem mevcut olduğunda şişebilen bir reaksiyon ürünüdür. Bu durumun ardından jelin meydana getirdiği basınç, beton yapılarda çimento esaslı malzemenin genleşmesine, çatlamasına, mekanik dayanımın ve dayanıklılığın kaybına neden olur [68-70]. Resim 2.2'de

ASR nedeniyle çatlamalara maruz kalmış beton yapılar sunulmuştur [71]. ASR'yi önlemenin yolları olarak aşağıdaki maddeler söylenebilir [68-70].

- Reaktif silis içermeyen agrega kullanmak;
- Alkaliliği düşük çimento kullanmak;
- Beton bünyesine su girişini önlemek;
- Puzolanik maddeler kullanmak.

$$SiO_2 + 2NaOH + H_2O \longleftrightarrow Na_2.SiO_3.2H_2O \quad (2.3)$$



Resim 2.2. ASR jeli genleşmesi nedeniyle çatlayan duvar örnekleri

Puzolan veya puzolanik malzeme terimi, ASTM C51 standardında "kendi başına bağlayıcılık değeri çok az olan veya hiç olmayan, ancak ince bölünmüş formda ve nem varlığında alkali ve alkali toprak hidroksitlerle (Portland çimento tarafından salınan kalsiyum hidroksit) bağlayıcı özelliklere sahip bileşikler (kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) veya kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H)) oluşturmak veya oluşturmaya yardımcı olmak için normal sıcaklıklarda kimyasal olarak reaksiyona giren silisli veya alümino-silisli malzeme" olarak tanımlanır [72]. Bu reaksiyon Eş. 2.4'te verilmiştir ve puzolanik aktivite olarak tanımlanmıştır [73]. Çimento hamuru, küçük C-S-H taneciklerinden, kılcal gözeneklerden ve büyük hidratlı ürün kristallerinden oluşur. Bu nedenle, mikro boyutlu puzolanik parçacıklar bu tür gözenekleri doldurarak çimento ürününü daha kompakt hale getirmektedir. Puzolanik malzemeler belirli bir alkali içeriğe sahiptir, ancak alkalileri bağlayabildikleri ve reaktif agregaların reaksiyona girmesini sınırlandırabildikleri için ASR'yi kontrol ettikleri rapor edilmiştir. Puzolanik malzemeler farklı kimyasal bileşimlere,

mineralojik yapıya ve jeolojik kökene sahip çok çeşitli malzemeleri içerir. Puzolanik malzemeler doğadan veya endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi yapay kaynaklardan gelebilir [74-76].

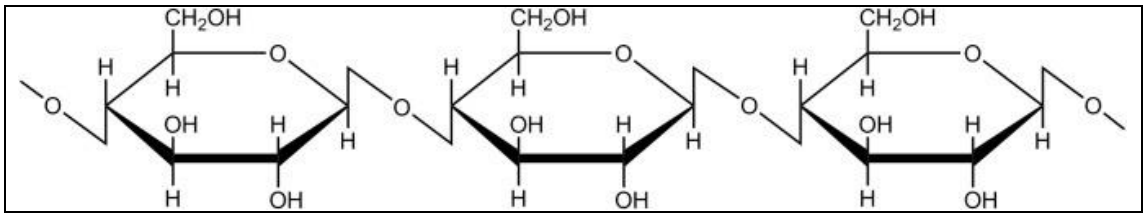
$$Ca(OH)_2 + H_4SiO_4 \longrightarrow CaH_2SiO_4.2H_2O \quad (2.4)$$

2.2.2. Lif

Beton üretiminde hacimce %0,5'ten daha düşük seviyede lif kullanılırken, lifler çimento kompozit levhalarda hacimce %10'dan daha düşük seviyelerinde bulunmaktadır. Lifler, çimentonun hidratasyon reaksiyonu sırasında bir su deposu görevi görür, böylece otojen büzülmeyi (kendi kendine kuruma) azaltır. Çimentoya lif eklemenin temel faydaları çekme dayanımının, eğilme dayanımının ve tokluğun iyileştirilmesidir. Ayrıca lifler aynı zamanda çoğu zaman ana işlevi olan çatlak ilerlemesini geciktirmekte veya önlemektedir. Bu faydalar, liflerin boyutunun nano ölçeğe düşürülmesiyle artırılabilir. Selülozik lif kullanmanın diğer avantajları ise serbest plastik büzülmenin ve ısıl iletkenliğin azaltılması ve ses emiliminin arttırılmasıyla akustik performansın iyileştirilmesidir. Ancak basınç dayanımı gibi diğer mekanik özellikler üzerinde de bazı yan etkileri olabilir. Takviye fazı mekanizması karmaşıktır ve sonuçlar, lifin türüne, lif miktarına, matris yapısına ve lif-matris arası etkileşime bağlıdır [60, 77-78].

Liflerin takviye fazındaki rolünü tanımlarken göz önünde bulundurulması gereken üç ana husus liflerin doğası, içsel mekanik özellikleri ve morfolojisidir. Liflerin doğası, lif-matris etkileşimlerini belirlediğinden matrisle uyumluluk açısından anahtar görevi görür. Çimento inorganik ve hidrofilik olduğundan, PE, PP gibi hidrofobik liflerden ziyade hidrofilik olan selüloz lifleriyle daha uyumludur. Selüloz lifinin kimyasal gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Ancak liflerin su ile etkileşimi sertleşme sürecini etkileyebilir, sertleşmiş malzemenin kinetiğini veya nihai bileşimini değiştirebilir. Liflerin doğası, takviye fazının içsel mekanik özelliklerini de belirler. Selüloz lifleri oldukça esnektir, çelik veya karbon lifleri ise daha serttir. Gerekli olan temel lif özellikleri çekme mukavemeti, süneklik, yüksek elastikiyet modülü şeklindedir. Liflerin morfolojisi (en boy oranı, uzunluk, yüzey pürüzlülüğü) takviye fazı mekanizmasını belirler ve matris ile etkileşimi ve çimentonun işlenebilirliğini etkiler. Lif boyutu çatlak köprüleme mekanizmasında önemli bir rol oynar. Makrofiberler makro ölçekli çatlakları köprüleyerek daha fazla çatlak büyümesini kısıtlarken, mikrofiberler mikro

çatlakları köprülemede daha etkili olup bu çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini önler. Ek olarak makrofiberler, çimento kompozit levhalara çok daha yüksek bir dayanıklılık sağlamak için plastik deformasyon, sürtünme ve sonunda çekilme yoluyla enerjiyi emer. Lif en boy oranı aynı zamanda takviye fazının işlevini yerine getirmesi için de önemlidir; takviye etkisi en boy oranıyla birlikte artar. Lifler fazla miktarda kullanıldığında taze harcın işlenebilirliğini ve reolojisini etkiler ve bu durum karışımın homojenleştirilmesindeki zorluklar nedeniyle takviye etkisini azaltır. Bu durum, kullanılacak lif miktarını ve takviye etkisindeki potansiyel iyileşmeyi sınırlamaktadır [78-79].


CH2OH
O
H
OH
H
H
H

köşelidir ve genellikle yüksek mukavemet ve düşük işlenebilirlik sağlar. Çakıl şeklindeki agregaların özellikleri ise büyük ölçüde türetildiği ana kayaya bağlıdır, ancak daha zayıf parçacıklar aşınma yoluyla uzaklaştırılma eğiliminde olduğundan ana kayadan biraz daha güçlü olur. Bu agrega, daha yüksek işlenebilirlik ve daha düşük mukavemet sağlayan daha yuvarlak parçacıklar içerir. Alüvyon birikintileri, buzul çökeltileri ve kumsal veya deniz yatağı gibi birçok farklı kaynağı mevcuttur. Yapay agregalar ise hafif ve ağır olarak sınıflandırılmaktadırlar. Hafif agregalar genellikle cüruf veya maden ocağı şistleri gibi endüstriyel yan ürünlerden üretilir ve kullanımıyla betonun ağırlığını azaltmaları amaçlanır. Hafif yapay agregalardan üretilen beton genel olarak daha düşük yoğunluk, düşük mukavemet, düşük ısı iletkenliği ve iyi yangın direnci özelliklerine sahiptir. Ağır agregalar ise radyasyondan korunmak için kullanılır ve bazı durumlarda çelik kadar ağır olabilir [75, 81-83]. Bunlara ek olarak geri dönüştürme çalışmaları kapsamında pek çok atık malzeme türü test edilmekte ve agrega olarak kullanılmaktadır [84]. Çizelge 2.5'te yaygın olarak kullanılan agrega çeşitleri verilmiştir.

Çizelge 2.5. Beton üretiminde yaygın olarak kullanılan agregalar [75, 80-83]

Agrega çeşitleri		
Kuvars	Kalsit	Bazalt
Opal	Dolomit	Granit
Kalsedon	Kireçtaşı	Siyenit
Feldispat	Marn	Diyorit
Kil	Kiltaşı	Peridotit
Mika	Pomza	Felsit
Zeolit	Tüf	Metakuvarsit
Alçıtaşı	Cüruf	Şist
Hematit	Perlit	Şeyl
Manyetit	Dirgen	Arjilit

Özetlemek gerekirse agregalar;

- Betonun kütlesinin ve hacminin çoğunu oluşturur,
- Çimento hamurundan daha düşük maliyete ve geçirgenliğe sahiptir,
- Çimento hamurundan daha güçlü ve stabildir,
- Betonun yoğunluğunu ve termal özelliklerini kontrol etmeye yardımcı olur,
- Su ve çimento hamurunun karıştırılmasına yardımcı olur,
- Yüzey sertliğini kontrol eder [65, 75, 81-84].

2.3. Çimento Kompozit Levha Üretiminde Sürdürülebilirlik

İnşaat endüstrisi atık depolama alanlarına atılan atıkların %45 ila %65'ini üretmektedir ve bu da küresel CO_2 emisyonlarının %35'inden sorumludur. Bu kapsamda firmalar, rekabet avantajı sağlamanın yalnızca minimum maliyete dayalı müşteri memnuniyetine ve sunulan hizmete veya ürünün kalitesine bağlı olmadığının giderek daha fazla farkına varmaktadır. Müşteriler, firmaların çevreye duyarlı, ahlaki ve sosyal açıdan sorumlu olmasını da önemsemektedir. Bu nedenle inşaatta sürdürülebilirliğin ciddi şekilde araştırılması gerekmektedir. Araştırmacılar inşaatta sürdürülebilirliğe yönelik çeşitli yaklaşımlar bildirmişlerdir. Sürdürülebilirlik üzerinde en fazla etkiye sahip olan konseptlerden biri de çimentolu kompozit levhalarda atık malzeme kullanımıdır. Atık malzemeler kentsel, tarım ve endüstriyel kaynaklı olarak sınıflandırılabilir [2, 85]. Daha önce inşaat malzemelerinde kullanılan farklı atık malzeme türleri Çizelge 2.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 2.6. İnşaat malzemelerinde kullanılan atık malzeme türleri [85]

Kentsel Atık	Tarımsal Atık	Endüstriyel Atık
İnşaat ve yıkıntı atıkları	Pirinç kabuğu külü	Uçucu kül
Atık plastik	Küspe külü	Cüruf
Atık cam	Mısır koçanı külü	Silis dumanı
Atık kauçuk	Talaş külü	Kırmızı çamur
Kağıt hamuru	Meyve/sebze lifleri	Filtre keki

Çimento klinkeri ve katkılı çimento üretiminde büyük miktarlarda atık malzeme tüketilebilmesine rağmen, atıkların betonda agrega olarak kullanılması durumunda bu tüketim çok daha önemli ölçüde artabilmektedir. Atık malzemelerin bu şekilde kullanılması, inşaat sahalarındaki agrega arz sorunlarını çözebilir, agrega madenciliği ve atık bertarafıyla ilgili çevresel sorunları azaltabilir. Atık agregaların kullanılması beton üretim maliyetini de azaltabilir. Geleneksel betonda ince agrega olarak kum, kaba agrega olarak ise çeşitli boyut ve şekillerde çakıl, kireçtaşı ve granit bulunmaktadır. Atık malzemelerin agrega olarak kullanılmasına ilgi artmakta ve granül kömür külü, yüksek fırın cürufu, atık cam, atık plastikler, kauçuk atıklar gibi geleneksel agrega yerine kullanılması konusunda önemli araştırmalar sürmektedir [2, 85-88].

Sanayileşme ve kentleşmenin ilerlemesi, mevcut yapıların kapsamlı bir şekilde yenilenmesini gerektirmekte ve bu da çok büyük miktarlarda inşaat ve yıkım atığının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıklarıyla ilgili en önemli endişe, bunların güvenli bir şekilde boşaltılmasını gerektirmektedir. Modern inşaat sektörü azalan doğal malzemeler ve artan inşaat ve yıkıntı atıkları gibi iki büyük sorunla karşı karşıyadır. İnşaat malzemelerinde kullanılmak üzere inşaat ve yıkıntı atıklarının yeniden işlenmesi, her iki sorunu da aynı anda çözebilir. Atık betonun inşaat ve yıkıntı atıklarından agrega olarak geri dönüştürülmesi, çimentolu kompozit levhalardaki doğal agregaya bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Atık beton kaynakları arasında yıkılmış bina atıkları, prefabrik beton elemanlar, karıştırma tesislerinde kullanılmamış beton ve test sonrasında laboratuvarlardan alınan beton numuneleri yer almaktadır. Bu nedenle, inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması, inşaat ve yıkıntı atık hacmini azaltmanın uygun maliyetli ve çevreye duyarlı bir yolu olacaktır. Geri dönüştürülmüş agregaların çimentolu malzemelerde doğal agrega yerine kullanılması, işlenebilirliği ve mekanik performansı azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla geri dönüştürülmüş agregaların kullanımı sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunur ancak ürün özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ancak farklı tekniklerin uygulanması bunların zararlı etkilerini azaltabilir [2, 86-88].

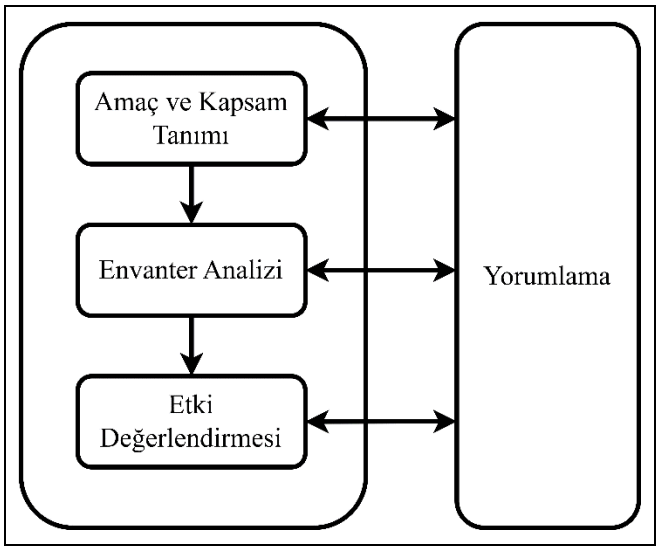
İnşaatta sürdürülebilirliğe katkıda bulunan diğer faktörler arasında doğal liflerin kullanımı yer almaktadır. Doğal lifler, öncelikle özelliklerinden dolayı çevre dostu kompozit malzemelerin geliştirilmesinde büyük ilgi görmüştür. Örneğin maliyet verimliliği, düşük yoğunluk, yenilenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik avantajlı özelliklerden birkaçıdır. İnşaat malzemelerinde kullanılan doğal lif türleri arasında palmiye, kenevir, hindistan cevizi, muz, bambu, jüt, abaka, sisal, kenaf, küspe, yün, keten kumaş vb. yer almaktadır. Sürdürülebilir yaklaşıma ek olarak, inşaat malzemelerinde doğal liflerin kullanımı ürünlerin çeşitli özelliklerini geliştirebilir. Doğal liflerin nihai ürün üzerindeki etkisi, bunların türü, geometrisi (şekil, çap ve uzunluk), miktarı, bağlayıcı ile etkileşimi ve karışım içindeki yönelim ve dağılım ile belirlenmektedir. Sonuç olarak, geleneksel katkı maddeleri yerine doğal liflerin kullanılması, benzer mekanik özellikler sergileyen nihai ürün eldesi ve sera gazı emisyonlarında azalma gibi faydalara sahip olabilirler. Güncel araştırmalar umut verici sonuçlar vermektedir, ancak ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal liflerin çimento kompozit levhaların üretiminde kullanımı mekanik performansı önemli ölçüde artırabilirken, fiziksel özellikler üzerindeki olumsuz etkisi nedeniyle daha yüksek oranda kullanımları sınırlıdır. Daha yüksek oranlarda, liflerin düzgün dağılımı mümkün değildir, bu

da işlenebilirliğin azalmasına ve sonuçta mekanik mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır [2,78].

2.4. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) veya İngilizce literatürdeki karşılığı olan Life Cycle Assessment (LCA), bir ürün veya hizmetin tüm ömrü boyunca (ham madde çıkarma, lojistik, üretim, kullanım ve atık bertaraf işlemlerinin ömrünün sonuna kadar) potansiyel çevresel etkisini değerlendirmeye yönelik uluslararası standartlaştırılmış bir yöntemdir [90-91]. YDD özellikle mevcut teknolojik çözümlerin seçilmesi ve optimize edilmesi ihtiyacını karşılayan bir karar verme aracıdır ve hangi proseslerin öncelik sırasına göre iyileştirilmesi gerektiğini öne çıkardığı için de teknolojik gelişmelerin tamamlayıcısıdır. YDD, sürdürülebilirlik perspektifinden özellikle önemlidir, çünkü bir ürün veya hizmetin tüm yaşam döngüsünü kapsamakta ve yerel iyileştirmelerin yalnızca çevresel etkiyi başka bir yere kaydırmasıyla sonuçlanmasını önlemektedir. Ayrıca, çevresel performansı işlevselliğe bağlaması, kirletici emisyonları ölçmesi ve ürün veya sistemin işlevine dayalı olarak ham madde kullanımını belirlemesi nedeniyle diğer çevresel yöntemlerden farklılık gösterir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi ifadesi, bir ürünün tasarım aşamasından nihai imhasına kadar tüm etkilerini kapsayan bu yaklaşımın genişliğini aktarır. YDD bir ürün veya hizmetin çevresel etkisini değerlendirir; değerlendirme belirli bir fonksiyona dayalıdır ve tüm yaşam döngüsü aşamalarını dikkate alır. Bir ürünün yaşam döngüsünde çevresel iyileştirmelerin nerede yapılabileceğinin belirlenmesine yardımcı olur ve yeni ürünlerin tasarlanmasına yardımcı olur. YDD öncelikle çeşitli ürünleri, süreçleri veya sistemleri ve ayrıca belirli bir ürünün farklı yaşam döngüsü aşamalarını karşılaştırmak için kullanılır [91-92].

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) ISO 14040 standardında ve Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC) tarafından sağlanan tanımlara göre bir YDD çalışması, amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanmasından oluşur [89-90, 93]. YDD aşamaları Şekil 2.2'de verilmiştir.

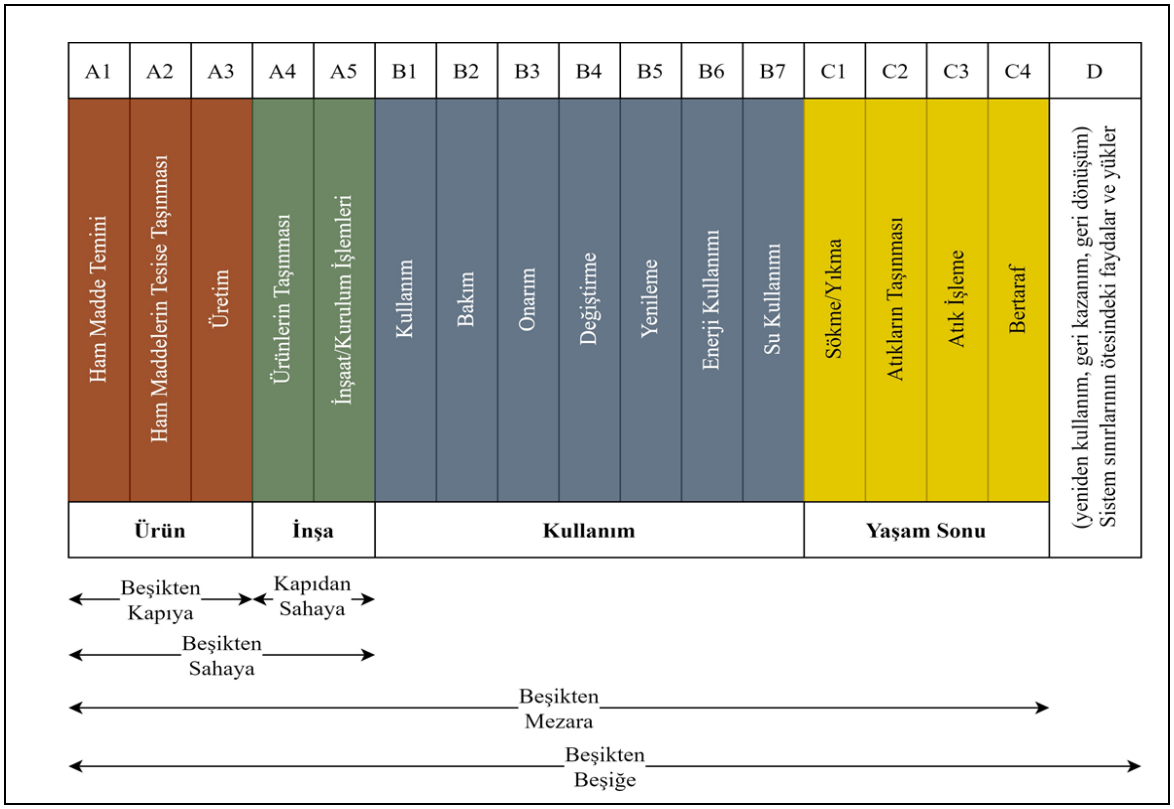


Şekil 2.2. YDD'nin yinelemeli aşamaları [94]

Amaç ve kapsam tanımında, problem açıklanmakta ve çalışmanın amaçları ve kapsamı tanımlanmaktadır. Bu noktada çok sayıda önemli unsur belirlenir: sistemin işlevi, emisyonların ve ekstraksiyonların dayanacağı işlevsel birim ve sistem sınırları. Son olarak, temel senaryo ve alternatifler ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Envanter analizinde, havaya, suya ve toprağa yönelik kirletici emisyonların yanı sıra yenilenebilir ve yenilenemez ham maddelerin ekstraksiyonu da değerlendirilir. Sistemin işleyişi için gerekli olan kaynak kullanımı da burada belirlenmektedir. Etki değerlendirmesi, envantere alınan emisyonlardan kaynaklanan çevresel etkileri değerlendirir. Bu aşamada etki kategorileri, kategori göstergeleri ve karakterizasyon modelleri seçilir. Ardından, her bir çevresel etki kategorisine (küresel ısınma, kümülatif enerji talebi, ekotoksisite vb.) katkıda bulunan emisyonlar sınıflandırılır. Yorumlama, şu ana kadar elde edilen sonuçların yorumlandığı ve belirsizliklerin değerlendirildiği yerdir. Temel parametreler ve iyileştirme seçenekleri, duyarlılık çalışmaları ve belirsizlik yayılımı kullanılarak belirlenebilir ve kritik bir analiz, seçilen sınırların ve hipotezlerin etkisini değerlendirir [91-94].

YDD'nin bu dört aşamasının hepsinin aynı olgunluk düzeyine ulaşmadığını belirtmek önemlidir. Hedef ve kapsam tanımlama aşaması iyi gelişmiştir. Özellikle emisyonların ve ekstraksiyonların bir üründen diğer bir yan ürüne tahsis edilmesinin gerekli olduğu aşamada, envanter aşamasını ilerletmek için yeni gelişmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca veri kullanılabilirliği ve güvenilirliğinin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Son zamanlarda etki değerlendirmesinde büyük ilerleme kaydedilmiştir. Analiz çerçeveleri artık çoğu etki

kategorisinde kapsamlı şekilde tanımlanmıştır. Yorumlama aşamasında belirsizlik analizini içeren az sayıda çalışma vardır ancak son zamanlarda YDD'ye uygulanabilecek belirsizlik yöntemlerinde gelişmeler yaşanmaktadır. Bu boşluğun gelecekteki YDD uygulamalarında bir öncelik olarak doldurulması gerekmektedir [91-94]. Benzer şekilde EN 15978 standardı, (i) ürün aşaması (A1-A3 modülleri: ham madde tedarikinden üretime kadar), (ii) inşaat süreci aşaması (modül A4: sahaya nakliye ve modül A5: yerinde inşaat), (iii) kullanım aşaması (B1-B7 modülleri: kullanım, bakım, onarım, değiştirme, yenileme ve enerji/su kullanımı) ve (iv) yaşam sonu aşaması (C1-C4 modülleri: yıkımdan nihai bertarafa kadar) aşamalarını kapsamaktadır ve bu aşamalar Şekil 2.3'te gösterilmiştir. 'Beşikten kapıya' terimi ürün aşamasını (A1-A3 modülleri), 'kapıdan sahaya' inşaat süreci aşamasını (A4-A5 modülleri), 'beşikten sahaya' terimi ise A1-A5 modül aralığını ifade etmektedir. Ayrıca A1-C4 modül aralığı ürünün ömrünün tüm aşamalarını kapsadığı için 'beşikten mezara' olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda tüm bu terimlere ek olarak beşikten beşiğe terimi de türetilip yaygınlaşmaya başlamıştır [95-97]. 'Beşikten beşiğe', her tür ürünün, kullanım ömrünün sonunda gerçek anlamda geri dönüştürülebilecek (ileri dönüştürülebilecek), doğanın döngüsünü taklit edecek ve her şeyin geri dönüştürüleceği veya dünyaya geri döndürüleceği şekilde tasarlanması ve üretilmesi olarak tanımlanabilir [98].



Şekil 2.3. YDD sistem sınırları ve aşamalar arasındaki bağlantılar

2.5. Atık Camın Agrega Olarak Kullanılması ile İlgili Önceki Çalışmalar

Yüksek lisans tez çalışmasının temel amacı inşaat endüstrisinin önemli bir kolu olan çimento kompozit levha üretiminde atık camın değerlendirilmesidir. Atık camlar daha önce yapılan çalışmalarda beton harcı içerisinde kullanılmıştır fakat çimento kompozit çalışmalarında partikül boyutuna ve ikame oranına göre etkisi incelenmemiştir. Literatür araştırmaları doğrultusunda atık camın çimento kompozit levhalarda ve betonda alkali-silika reaksiyonuna sebep olduğu bilinmektedir. Ancak camın partikül boyutu 100 mikrondan düşük seviyelere geldiği zaman puzolanik reaksiyonun baskınlığının arttığı da belirtilmektedir. Bu bölümde atık cam kullanılarak üretilen çimento bazlı ürünler ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Ali ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş cam atıklarının ince agrega olarak kullanılmasının kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada atık cam agregaya %10; %20; %30; %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiştir ve partikül boyutu <5 mm seviyesindedir. Araştırma, geri dönüştürülmüş camın taze beton özelliklerini artırırken sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini azalttığını göstermektedir. Taze betonun özelliklerine bakıldığında, özellikle geri dönüştürülmüş cam içeriğinin artmasıyla birlikte kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığının ve viskozitesinin arttığı belirtilmektedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş cam içeriğinin artmasıyla birlikte beton karışımının geçirgenlik ve dolum yeteneğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, sertleşmiş betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastikiyet modülünde azalma gözlemlenmiştir. Atık cam ikame edilmesiyle numunelerin basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastikiyet modülü sırasıyla %23,6; %31,9; %24,3 ve %12,6 oranlarında düşüş göstermiştir. En düşük değer veren numunelerin %50 atık cam ikame edilmiş olan numuneler olduğu belirtilmiştir. Eğilme dayanımı değerinin ise %30 atık cam ikame oranına kadar %12 seviyesine varan düşüş gösterdiği ortaya konulmuştur. Bu durum, geri dönüştürülmüş camın pürüzsüz yüzeyinin çimento pastası ile zayıf bağlantıya ve çatlak oluşumuna neden olmasıyla açıklanmaktadır [34].

Limbachiya ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada doğal kum yerine atık cam içeren beton karışımlarının performansı ve atık camın betonda kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışmada kullanılan ve meşrubat şişelerinden elde edilen atık cam 5 mm'den daha düşük

partikül boyutuna sahiptir ve agregaya %15; %20; %30 ve %50 oranlarında ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Numune üretiminden önce yapılan analizlerde atık camın yoğunluğunun ve su emme oranının doğal kuma göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Beton karışımlarıyla ilgili yapılan testler, %15'e kadar atık cam içeren betonun doğal agregalarla üretilen betonla benzer performans gösterdiğini belirlemiştir. Araştırma, %20'ye kadar atık cam içeriğinin betonun basınç dayanımı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ancak %20'nin ötesinde, atık cam içeriğinin artmasıyla birlikte mukavemette kademeli bir azalma gözlemlenmiştir. Ek olarak, eğilme mukavemeti, elastikiyet modülü ve büzülme gibi özellikleri, doğal agrega karışımlarıyla karşılaştırıldığında %20'ye kadar atık cam içeren beton karışımları için benzer performans göstermektedir. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) ile ilgili olarak test için %20'ye kadar WGS içeriğine sahip harç çubuğu numuneleri hazırlanmıştır. Sonuçlar, ilk günlerde atık cam ikamesinin belirgin bir etkisinin olmadığını, ancak 6 gün sonra genişlemelerin giderek arttığını göstermiştir. Sonuç olarak, atık camın keskin kenarlara, sert yapıda olması ve ince halde bulunmaması gibi durumlar, beton karışımlarının kıvamını ve plastik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir fakat mekanik özellikler üzerinde %15-20 seviyesine kadar gözle görülür derecede negatif etki etmemiştir [35].

Park ve arkadaşları (2004) yılında yapmış oldukları çalışmada atık cam agregası içeren betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kullanılan üç farklı atık cam (amber, zümrüt yeşili ve kristal) da 5 mm'den daha küçük partikül boyutuna sahiptir ve karışımda kullanılan agregaya %30, %50 ve %70 olacak şekilde ikame edilmiştir. Çalışmada atık cam kullanımının hem taze betonun hem de sertleşmiş betonun özelliklerini etkilediği bulunmuştur. Taze betonda, atık camın köşeli partikül şeklinin işlenebilirliği etkilemesi nedeniyle atık cam içeriği arttıkça çökme ve sıkışma faktörü azalmıştır. Ek olarak, taze betondaki hava içeriği, atık cam agrega içeriğinin artmasıyla birlikte artmıştır. Sertleşmiş beton özellikleri açısından bakıldığında, atık cam içeriği arttıkça betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Atık cam agregaları ile çimento hamuru arasındaki yapışma mukavemeti, atık cam içeriğinin artmasıyla azalmış ve bu da mukavemet özelliklerinde azalmaya yol açmıştır. Kompozit çimento levhaların analizinde da uygulanacak olan eğilme dayanımı testi sonuçları incelendiğinde kontrol numunesinin eğilme dayanımı 5,7 MPa olarak bulunurken %30, %50 ve %70 atık cam agrega ikame edilmiş numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesine göre sırasıyla %3,5; %12,3 ve %19,3 düşüş göstermiştir. Çalışma ayrıca, atık cam agregalarının betona dahil edilmesi

sırasında işlenebilirliği korumak ve çökmenin azalmasını önlemek için uygun bir katkı maddesi kullanılmasının gerekli olduğunu da göstermiştir [36].

Sikora ve arkadaşları (2016) yapmış oldukları çalışmada atık cam agregası ve nanomalzeme İçeren çimento harçlarının mekanik ve bakteriyel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada 2 mm altı kahverengi meşrubat şişesi cam atığı kullanılmıştır. Atık camın agregaya %25; %50, %75 ve %100 ikame edilmesiyle numuneler üretilmiş ve bu numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme oranı ve gözeneklilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde atık camına agregaya ikame oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımının düşüş gösterdiği bulunmuştur. %25; %50; %75 ve %100 atık cam ikame edilmiş numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla %6,0; %10,7; %14,3 ve %14,3 artış göstermiştir. Basınç dayanımı sonuçlarında ise %25 atık cam ikamesine sahip numune kontrol numunesine göre %7,8 artış göstererek 55 MPa olarak sonuç verirken bu oran arttıkça numunelerin basınç dayanımları kontrol numunesine göre sırasıyla %5,9; %5,9 ve %7,8 düşmüştür. Numunelerin su emme oranları da atık cam ikamesi arttıkça düşüş göstermiştir. En yüksek sonucu veren %100 ikame oranına sahip numunenin bu değeri kontrol numunesinin sonucuna göre %37,5 artmıştır. Diğer su emme oranları ise %25; %50 ve %75 ikame oranına sahip numuneler için sırasıyla %11,3; %16,3 ve %31,3 artış göstermiştir. Gözeneklilik değerleri de de su emme oranı sonuçları ile paralellik göstermiştir. Başka bir deyişle, atık cam ikame oranı arttıkça gözeneklilik artmıştır ve en yüksek sonucu %100 atık cam ikame oranına sahip numune vermiştir. Sonuç olarak, atık cam agregaları ile çimento hamuru arasındaki zayıf yapışma eğilme ve basınç dayanımının azalmasına katkıda bulunmuştur. Atık camın varlığı, harçların toplam gözenekliliğini ve su emme oranını arttırarak çimento harçlarının mikro yapısını büyük ölçüde etkilemiştir [37].

Tan ve arkadaşları (2013) yapmış oldukları çalışmada atık camın kum yerine ikame olarak kullanılmasının çimento harcının taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 4,75 mm altı yeşil, şeffaf, kahverengi ve karışık renkte atık camlar kullanılmıştır. Atık camın agregaya %25; %50, %75 ve %100 ikame edilmesiyle numuneler üretilmiş ve bu numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, çekme dayanımı, yoğunluk ve elastikiyet modülü analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle cam içeriği %75'ten az olduğunda, cam renginin yoğunluk üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır. %100 ikame oranına sahip numunelerde ise kahverengi, yeşil, şeffaf ve karışık renkli atık cam içeren numunelerin yoğunluğu kontrol numunesine göre %3; %4;, %5 ve %3 düşüş göstermiştir. Atık cam

kullanımı, cam parçacıklarının pürüzsüz yüzeyi ve daha keskin kenarları nedeniyle cam parçacıkları ile çimento hamuru matrisi arasındaki yapıyı bozmuş, daha zayıf basınç dayanımına neden olmuştur. Yeşil atık cam basınç dayanımında en az azalmayı göstermiş, hatta %25 ikame oranında yaklaşık %2'lik bir artış göstermiştir. Eğilme dayanımındaki azalma, özellikle şeffaf cam durumunda, %25'i aşan atık cam içeriğinde açıkça görülmüştür. Diğer cam türleri için, atık cam içeriği %75'ten az olduğunda 28 günlük dayanımdaki azalma %10'dan az olarak tespit edilmiştir. %100 ikame oranına sahip numunelerde kahverengi, yeşil, şeffaf ve karışık atık cam agrega kullanımı kontrol numunesine göre eğilme dayanımını sırasıyla %24; %10; %30 ve %24 seviyelerinde düşürmüştür. Eğilme dayanımındaki azalma, basınç dayanımı ile aynı sebebe, yani cam ile çimento harcı arasındaki zayıf etkileşime ve mikro çatlamaya dayanmaktadır. Atık cam ikamesine sahip numuneler 2,85 ile 3,95 MPa arasında değişen çekme dayanımı sergilemiştir. %25 oranında kahverengi, yeşil, şeffaf ve karışık cam içeren harcın çekme dayanımında hafif bir artış görülmüştür. Bununla birlikte, daha yüksek cam yüzdeleri ile, camın renginden bağımsız olarak çekme dayanımı azalmıştır. Şeffaf cam için, cam içeriğinin artmasıyla birlikte çekme dayanımı tutarlı bir şekilde azalmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları ile karşılaştırıldığında, çekme dayanımındaki azalma daha az belirgin olmuştur. Bunun nedeni olarak, muhtemelen camın daha keskin kenarlara ve daha yüksek en-boy oranına sahip olmasının daha yüksek derecede iç sürtünmeye yol açması gösterilmiştir. Harcın elastikiyet modülleri 23 ila 30 GPa arasında değişmiştir. Atık şeffaf cam, elastikiyet modülünde bariz bir azalmaya neden olmuştur. Diğer renkli camlarda ise, özellikle %50'ye kadar olan ikame oranlarında azalma daha düşük seviyede görülmüştür. %100 cam içeriğinde kahverengi, yeşil, şeffaf ve karışık cam kullanılan numunelerin elastikiyet modülü kontrol numunesine göre sırasıyla %3; %7; %20 ve %12 düşmüştür. Camın elastikiyet modülü kumdan daha yüksek olmasına rağmen daha zayıf bağ kurması ve gözenekli mikro yapısı, özellikle şeffaf cam kullanımında mikro çatlak nedeniyle daha düşük modüle yol açmıştır. Diğer mekanik özelliklerle karşılaştırıldığında elastikiyet modülün en az etkilendiği görülmüştür. Yeşil, kahverengi ve karışık renkli cam için yapılan ASR genleşmesi cam içeriğinin artmasıyla azalmıştır; bu da yeşil ve kahverengi camların alkali ile doğal kuma göre daha az reaktif olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, yeşil ve kahverengi cam kumunun ASR için herhangi bir risk oluşturmayacağı görülmektedir [38].

Tuaum ve arkadaşları (2018) yapmış oldukları çalışmada geri dönüştürülmüş cam agrega katkılı kendiliğinden yerleşen harcın özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan soda

kireç camı 2,36 mm'den daha düşük partikül boyutuna sahiptir. Atık cam agregası reçetede kullanılan agregaya sırasıyla %10; %20; %30; %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiş ve üretilen numunelerin yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme oranları incelenmiştir. Kontrol numunesinin yoğunluğu 2385 kg/m3 olarak bulunurken atık cam ikame oranı arttıkça yoğunluğun düştüğü tespit edilmiştir. Fakat bu düşüş en yüksek atık cam ikame oranına sahip numunede bile %1,59 azalma ile sınırlı kalmıştır. Yoğunluktaki bu azalma, bu araştırmada kullanılan atık camın parçacık yoğunluğunun doğal ince agreganın parçacık yoğunluğundan %1,3 oranında daha düşük olmasından kaynaklanabilir. Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde atık cam ikame oranı ile ters orantılı olduğu bulunmuştur. %10; %20; %30; %40 ve %50 ikame oranına sahip numunelerin basınç dayanımı sonuçları, kontrol numunesine göre sırasıyla %1,8; %2,5; %6,6; %10,9 ve %15,3 azalmıştır. Bu azalma, kırılmaya karşı daha düşük tokluk dayanımına, pürüzsüz tane yüzeyine ve çimento hamuru matrisi ile cam parçacığı arasındaki zayıf ara yüzey bağına bağlanabilir. Bu durum eğilme dayanımı için de geçerlidir. Değerler ikame oranı arttıkça sırasıyla %1,4; %2,5; %6,0; %9,4 ve %11,7 düşmüştür. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı sonuçlarına benzer bir eğilim göstermiştir. Ancak atık cam ikamesinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi, basınç dayanımında görüldüğü kadar belirgin olmamıştır. Su emme oranları incelendiğinde atık cam ikame oranı arttıkça bu oranın, %7,11 sonucuna sahip kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla %0,6; %3,2; %7,0; %8,3 ve %11,5 azaldığı gözlemlenmiştir. Atık cam eklenmesinin su emme oranını biraz azalttığı bulunmuştur. Bu azalmanın nedeni atık camın suyu emmemesidir. Sonuç olarak, deneysel bulgular atık cam agregasının agrega içeriğinin %30'una kadar dayanım, yoğunluk ve su emme oranı üzerinde kayda değer bir etki olmaksızın başarılı bir şekilde ikame edilebileceğini göstermiştir [39].

Corinaldesi ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışmada atık camın agrega olarak çimento harcında kullanımını incelemişlerdir. Kullanılan atık camlar meşrubat şişelerinden ve inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilmişlerdir. Çalışmada A, B ve C kategori olmak üzere üç farklı sınıf mevcuttur ve bunlar sırasıyla 0-36 mikron; 36-50 mikron ve 50-100 mikron partikül boyutu aralığındadır. Atık camlar her bir partikül boyut aralığında agregaya %30 ve %70 olacak şekilde iki farklı oranda ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, açık gözeneklilik ve SEM analizleri yapılmış ve yorumlanmıştır. Eğilme dayanımına bakıldığında atık cam kullanılarak üretilmiş tüm numuneler kontrol numunesine göre ya aynı seviyede kalmış ya da daha iyi performans göstermiştir. C kategori atık cam %70 ikame oranı ile kullanıldığında en iyi eğilme dayanımı

elde edilmiştir ve bu değer kontrol numunesininkine göre %37,5 daha yüksektir. Basınç dayanımı incelendiğindeyse yine en düşük değeri veren numunenin kontrol numunesi olduğu görülmüştür. En yüksek değeri veren numune ise B kategori atık camdan %30 oranında kullanılan numune olmuştur. Numunelerin açık gözeneklilik oranları ise atık cam partikül boyutu arttıkça, yükseliş göstermiştir ve en yüksek değer %21 olarak C kategori atık camdan %70 oranında ikame kullanılan numuneden elde edilmiştir. Numunelerin SEM görüntüleri de mekanik ve fiziksel analizler ile paralel sonuçlar vermiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde atık camın agrega olarak kullanılmasının numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayda değer derecede düşüşe sebep olmadığı, gerçekleşmesi beklenen alkali-silika reaksiyonunun ise partikül boyutu 100 mikronun altına indiğinden gerçekleşmediği, aksine atık camın harcın mikro-yapısal özelliklerine katkı sağladığı belirtilmiştir [41].

Ismail ve arkadaşları (2009) yapmış oldukları çalışmada atık camın geri dönüştürülerek ince agrega olarak beton üretiminde değerlendirilmesini araştırmışlardır. Kullanılan cam atık sahalarından elde edilmiştir ve meşrubat şişeleri ve pencere camlarının karışımdan oluşmaktadır. Atık camın %99,98'unun partikül boyutu 2,36 mm altı seviyesindedir ve karışımda agregaya %10; %15 ve %20 oranlarında ikame edilmişlerdir. Üretilen numunelerin yoğunluk, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerini tespit etmek için analizler yapılmıştır. %10; %15 ve %20 atık cam ikame oranına sahip numunelerin yoğunluk değerleri kontrol numunesi ile oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi olarak karışımlarda agrega olarak kullanılan kum ve atık cam hemen hemen aynı yoğunluklara sahip olması gösterilmiştir. Eğilme dayanımları incelendiğinde ise kontrol numunesi 5,89 MPa sonuç verirken atık cam oranı %10'dan %20'ye doğru arttıkça bu değer sırasıyla %3,6; %7,0 ve %11,2 artış göstermiştir. Bu durum, bu süre zarfında puzolanik aktivitenin önemli ölçüde meydana geldiğini göstermektedir. Kontrol numunesinin basınç dayanımı 44 MPa olarak bulunmuştur. %10 ve %15 atık cam ikame oranına sahip numunelerin basınç dayanımı sırasıyla %8,4 ve %4,5 azalma gösterirken %20 atık cam ikame oranına sahip numune kontrol numunesine göre %4,3 artış göstermiştir. Bu durum atık cam agrega yüzeyi ile çimento hamuru arasındaki yapışma kuvvetinin azalmasına bağlanabilir. Puzolanik aktivitenin daha sonraki aşamalarda bu eğilimi dengelediği ve 28 günde basınç dayanımının artmasına yardımcı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, maksimum basınç ve eğilme dayanımı değerlerini veren atık camın optimum yüzdesi %20'dir. Atık camın ince agrega yerine kısmi ikame olarak kullanılması betonun renginde kayda değer bir değişiklik yaratmamıştır [42].

Penacho ve arkadaşları (2014) yapmış oldukları çalışmada ince atık camın agrega olarak ikame edildiği numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Numune hazırlamada kullanılan atık cam karışık camlardan oluşmaktadır ve partikül boyutu 2,38 mm'den düşüktür. Kontrol numunesinin yanı sıra atık camın agregaya %20; %50 ve %100 oranlarında ikame edilmesiyle numuneler üretilmiş ve bunların yoğunluk, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, elastikiyet modülü ve su emme oranı analizleri yürütülmüştür. Atık cam kullanılarak üretilen numunelerin yoğunluk sonuçları kontrol numunesine göre %20; %50 ve %100 ikame oranları için sırasıyla %2; %3 ve %11'lik düşüş göstermiştir. Bunun sebebi kullanılan atık camın orijinal agregadan daha düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde en düşük değerin 2.22 MPa ile kontrol numunesinden elde edildiği ve %20 ile %50 ikame oranlarında %22'lik artış yakalandığı görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçları ile eğilme dayanımı sonuçları paralellik göstermiştir. En yüksek sonucu, %50 ikame oranına sahip numune kontrol numunesine göre %16'lık artışla 7,20 MPa olarak vermiştir. Bunu takip eden %20 ikame oranlı numune 6,72 MPa sonuç verirken tamamen cam agregası kullanılarak üretilen numune kontrol numunesine göre %8 düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar, ince cam agregalarının puzolanik aktivitesi nedeniyle daha yüksek bağlayıcı özellikteki içeriğin olumlu etkisi ile açıklanmaktadır. Ayrıca sonuçlar, elastikiyet modülünün kumun yaklaşık %50'ye kadarı cam malzemeyle değiştirildiğinde arttığını göstermiştir. Bu noktadan sonra ise trend tersine dönmüştür. Bu, cam malzemenin elastikiyet modülünün kuma göre daha büyük olmasıyla açıklanmaktadır. Büyük miktarda cam eklendiğinde dayanım kaybı muhtemelen çimento-agrega bağının bozulmasından kaynaklanmaktadır çünkü cam malzemesi kumdan daha az gözeneklidir. Bununla beraber, beklendiği gibi, kılcal kuvvetler nedeniyle su emme oranı, cam ikame oranı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Atık cam kullanımıyla üretilen numunelerin gözenek çapları daha küçük olmasına rağmen, toplam gözenek hacmi cam ikame oranı arttıkça yükseliş göstermiştir. Bu değerler, yoğunluk sonuçları ile paralellik göstermektedir [43].

Topçu ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışmada atık cam kullanımının beton üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan atık cam renkli meşrubat şişelerinden elde edilmiş ve 4-16 mm partikül boyut aralığına sahiptir. Atık cam, çimento harcında agregaya %15; %30; %45 ve %60 oranlarında ikame edilmiştir. Üretilen numunelere taze çimento harcı özelliklerini belirlemek için yapılan testlerin yanı sıra bu çalışmada da gerçekleştirilecek olan basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve genleşme oranı analizleri yapılmıştır. Atık cam kullanılarak üretilmiş

numunelerin basınç dayanımları, kontrol numunesine göre ikame oranı arttıkça azalmıştır. Bunlar %15; %30; %45 ve %60 için sırasıyla %7,8; %14,8; %31,4 ve %48,8 oranlarında azalma göstermiştir. Eğilme dayanımında ise en yüksek sonuç %15 atık cam ikame oranına sahip numuneden 5,27 MPa olarak elde edilmiştir. Bununla beraber %45 atık cam ikame oranı da eğilme dayanımında kontrol numunesine göre %16,4 mertebesinde artışa neden olmuştur. Çekme dayanımı sonuçları da basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir. Başka bir deyişle atık cam miktarı arttıkça çekme dayanımı düşmüştür. Kontrol numunesine göre %15; %30; %45 ve %60 atık cam ikame oranına sahip numunelerin çekme dayanımları sırasıyla %9,7; %11,2; %9,3 ve %37,1 azalmıştır. Elastikiyet modülü sonuçlarına bakıldığında en yüksek değer %15 atık cam kullanılan numuneden yaklaşık 60 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değer kontrol numunesine göre %62,2 daha yüksektir. Tüm sonuçlar atık camın pürüzsüz ve köşeli yapısının çimento pastası ile olan bağı zayıflattığını ve bu nedenle atık cam oranı arttıkça numunelerin mekanik özelliklerinin azalma eğiliminde olduğu söylenebilir [47].

Lee ve arkadaşları (2013) yapmış oldukları çalışmada ince agrega olarak kullanılan atık camın beton bloklar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan atık camlar; A, B, C ve D olmak üzere 4 farklı kategoriye ayrılmışlardır. Bunlar sırasıyla; elenmemiş, <2,36 mm, <1,18 mm ve <600 mikron şeklindedir. Her farklı partikül boyutundaki atık camlar karışımdaki agregaya %25; %50; %75 ve %100 seviyelerinde ikame edilmişlerdir. Çalışma genelinde beton blokların yoğunluk, su emme oranı ve basınç dayanımı gibi özellikleri incelenmiştir. Yoğunluk ve su emme oranlarına bakıldığında kullanılan atık camın ikame oranı yükseldikçe ve partikül boyutu düştükçe, yoğunluğun azaldığı ve su emme oranının da arttığı görülmüştür. Kontrol numunesinin yoğunluk ve su emme oranları sırasıyla yaklaşık 2440 kg/m3 ve %4,1 iken %100 ikame oranına sahip D kategori atık cam kullanılan numunenin bu değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 2265 kg/m3 ve %6,4 olarak bulunmuştur. Numunelerin basınç dayanımı incelendiğinde D kategori atık camın ikame oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı değeri D kategori atık camın %100 oranında agregaya ikamesiyle 58,44 MPa olarak bulunmuştur ve bu değer kontrol numunesinin basınç dayanımına göre %34,3 daha yüksektir. Tüm sonuçlar ele alındığında yoğunluk ve su emme oranlarının atık camın partikül boyutuna göre birbirine paralel sonuçlar verdiği görülmektedir. Yani partikül boyutu küçüldükçe ve ikame oranı arttıkça beton blokun yapısı daha gözenekli hale gelmekte ve bu durum da hem yoğunluğu düşürmekte hem de su emme oranının artırmaktadır. Basınç dayanımına bakıldığında A, B

ve C kategori atık cam kullanılmış numunelerin kontrol numunesine göre daha düşük sonuçlar vermesinin sebebi olarak camların pürüzsüz yüzeye sahip olması nedeniyle azalan cam-çimento pastası arasında yüzey bağları ve camlardaki mikro seviyedeki çatlaklar gösterilebilir. D kategoriye geçildiğinde ise atık camın partikül boyutu puzolanik aktivite göstermeye başlamış olabileceğinden basınç dayanımı artış göstermiştir [49].

Wang (2009) yılında yapmış oldukları çalışmada atık LCD (liquid crystal display - sıvı kristal ekran) camlarının agrega olarak kum yerine kullanılmasının beton karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen LCD camı 4,76 mm'den daha düşük partikül boyutuna sahiptir ve agrega olarak %20; %40; %60 ve %80 kum yerine ikame edilmiştir. Üretilen numunelerin taze harç özellikleriyle beraber basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve elastikiyet modülü gibi mekanik özellikleri de incelenmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımları cam ikame oranının artması ile azalma göstermiştir. Karışımlardan %80'lik cam ikame oranına sahip olan numune en düşük basınç dayanımını vermiştir. %20 cam ikamesi durumunda ise, cam ve hidratasyon reaksiyonu ürünleri arasındaki etkileşimli kuvvetler betonun basınç dayanımını kısmen arttırmıştır. Basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla yalnızca %5'lik düşüş göstermiştir. Numunelerin kürlenme süresinin uzamasıyla eğilme dayanımları artmıştır. Bunlar arasında %20 cam ikamesinin eğilme dayanımları kontrol numunesine göre maksimum %4 düşüş göstermiştir. Numunelerin çekme dayanımı, cam ikame oranının artması ile azalmıştır. Ayrıca kürlenme süresi arttıkça da farklı miktarlarda cam ikamesi yapılan numunelerin çekme dayanımları kontrol grubununkini aşmıştır. %20 cam ikame oranına sahip numunenin çekme dayanımı kontrol numunesine göre ortalama %10 artış göstermiştir. Bu durum, atık cam ikameli numunelerin kürleme süresi uzadıkça daha iyi çekme dayanımına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Elastikiyet modülü sonuçlarına bakıldığında yine %20 cam ikame oranına sahip beton numunesinin büyük değeri verdiği görülmüştür. Elastikiyet modülü değerindeki artışlar ortalama olarak %30 seviyesinde bulunmuştur. Ayrıca ikame oranı arttıkça elastikiyet modülü değerleri azalmıştır. Tüm bu sonuçlar, optimum cam ikame oranının %20 olduğunu göstermektedir. SEM sonuçları, cam ile çimento hamuru arasındaki arayüzde yoğun C–S–H jel hidratın üretildiğini ve bunun betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırabileceğini göstermektedir [99].

Aliabdo ve arkadaşları (2016) yapmış oldukları çalışmada atık camın çimento ve beton üretimindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada atık cam ikame oranları %5; %10; %15;

%20 ve %25 olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan atık camın partikül boyutu 70 mikrondan daha küçük seviyededir. Camın ince boyutlarda puzolanik aktivite de gösterdiği bilindiğinden elde edilen numunelerin basınç dayanımı, yoğunluk, su emme oranı, eğilme dayanımı ve açık gözeneklilik değerleri incelenmiştir. Atık camın agregaya ikamesinde numunelerin basınç dayanımının %20,5 oranına kadar arttığı görülmüştür. En yüksek sonuç, %20 ikame oranına sahip numuneden alınırken, atık cam kullanılarak üretilen tüm numuneler kontrol numunesinden daha yüksek sonuç vermiştir. Eğilme dayanımı analizinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımını %20 agrega ikame oranına sahip numune 5,16 MPa değeri ile göstermiştir ve kontrol numunesine göre %17,3 artış göstermiştir. Bunun yanı sıra diğer numunelerin de eğilme dayanımları, kontrol numunesine göre daha yüksektir. Numunelerin su emme oranı ve açık gözeneklilik değerleri atık cam ikame oranı arttıkça düşmüştür. En düşük su emme oranı veaçık gözeneklilik değerleri sırasıyla %2,6 ve %6,1 olarak bulunmuştur. Yoğunluk değerinde ise durum tam tersidir, yani atık cam ikame oranı ile paralel olarak artış göstermiştir. En yüksek değer 2,39 g/cm3 olarak %25 atık cam ikame oranına sahip numuneden elde edilmiştir. Tüm sonuçlar ele alındığında atık camın %20 ikame oranında agregaya ikame edildiğinde hem fiziksel hem de mekanik performansı iyileştirici etkisi olduğu ve bu durumun atık camın düşük partikül boyutlarına sahip olması nedeniyle puzolanik aktivite gösterdiği gözler önüne serilmiştir [100].

3. MATERYAL ve METOT

Tez çalışması kapsamında yürütülen çalışmalar bu bölümde sunulmuştur. İlk olarak çimento, uçucu kül, selüloz ve silis kumu gibi kullanılan ham maddelerden bahsedilmiştir. Ardından çalışmada kullanılan atık camın kırma, öğütme ve eleme işlemleri anlatılmıştır. Sonrasında, çimento kompozit levha üretim prosesi ve devamında numunelere uygulanan eğilme dayanımı, su emme oranı, yoğunluk ve gözeneklilik analiz yöntemleri sunulmuştur. Son olarak elde edilen sonuçlara uygulanan istatistiksel analiz ve numunelere uygulanan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışması paylaşılmıştır.

3.1. Kullanılan Ham Maddeler

Tez çalışması boyunca kullanılan çimento, uçucu kül, silis kumu ve selüloz malzemeleri Tepe Betopan Yapı Malzemeleri A.Ş.'ye ait Ar-Ge Laboratuvarı'ndan elde edilmiştir. Atık kağıt hamuru Zonguldak'taki bir üretim tesisinden, atık cam ise atık toplama sahasından getirilen meşrubat şişelerinden elde edilmiştir.

3.1.1. Çimento

Tüm çalışmalarda çimento kompozit levha üretmek için CEM II 42,5 R gri çimento kullanılmıştır. Bu çimento TS EN 197-1:2012 standardına göre üretilmiştir [65]. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Çimento kompozit levha üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri [101]

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
Bileşen	İçerik oranı, %	Özellikler	Değerler
SiO_2	21,0 - 22,0	Yoğunluk	3,06 g/cm^3
Al_2O_3	5,0 - 6,0	Özgül Yüzey (Blaine)	4200-4400 cm^2/g
Fe_2O_3	3,0 - 3,5	Priz Başlangıcı	170-190 Dakika
CaO	60,0 - 62,0	Priz Sonu	190-220 Dakika
MgO	2,0 - 3,0	Su	%27,5-28,5
SO_3	2,30 - 3,00	Hacim Sabitliği	1,0 mm
Kızdırma Kaybı	3,0 - 4,5	0,045 mm Elekte Kalıntı	%0,4 – 0,8
Na_2O	0,2 - 0,4	2 Günlük Basınç Dayanımı	25-27 MPa
K_2O	0,5 - 0,7	28 Günlük Basınç Dayanımı	49-51 MPa
Klorür (Cl)	0,02 – 0,05		

3.1.2. Uçucu kül

Çalışmalarda kullanılan uçucu külün yoğunluğu ve özgül yüzey alanı sırasıyla 2,28 g/cm^3 ve 2754 cm^2/g olarak verilmiştir. Kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir. Uçucu küller sınıflandırılırken ASTM C 618 standardından yararlanılmaktadır. Bu standarda göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 oranları %70'ten büyük ve CaO oranı %10'dan küçük olduğu için kullanılan uçucu kül F (Class F) sınıfıdır [102].

Çizelge 3.2. Numune üretiminde kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri [103]

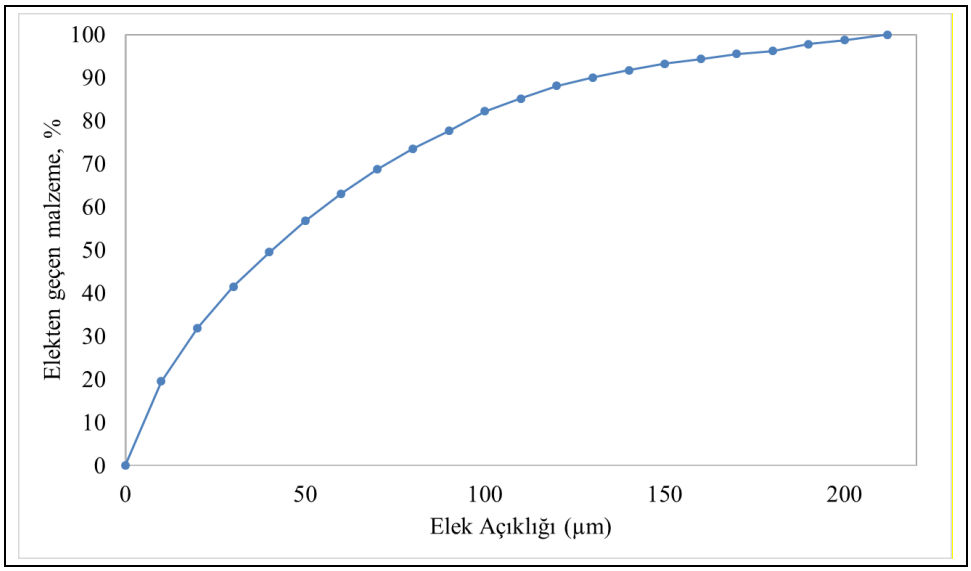
Kimyasal Özellikler	
Bileşen	İçerik oranı, %
SiO_2	54,15
Al_2O_3	17,02
Fe_2O_3	9,49
CaO	5,73
MgO	4,42
SO_3	2,42
Kızdırma Kaybı	2,41
Na_2O	0,33
K_2O	2,73

3.1.3. Selüloz

Yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan selüloz 2,5 mm boy ve 20 mikron çapa sahip liflerden oluşmaktadır. Üretim sahasında selüloz balyalarının "Pulper" ekipmanı yardımı ile hamurlaşması sağlanmaktadır. Ardından "Refiner" ekipmanı aracılığı ile de selüloz liflerinin açılması ve ^{o}SR derecesinin ideal seviyeye getirilmesi sağlanmaktadır. Bu aşamanın ardından stok tanklarında depolanan selüloz üretimde kullanıma hazır hale gelmektedir.

3.1.4. Silis kumu

Çalışmada agrega olarak silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu, 1,54 g/cm^3 yığın yoğunluğa, 2,63 g/cm^3 gerçek yoğunluğa ve %99,15 silika içeriğine sahiptir. Silis kumunun elek analizi sonuçları Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Silis kumu elek analizi sonuçları

3.1.5. Atık kağıt hamuru

Atık kağıt hamuru Zonguldak'ta bulunan bir üretim tesisinden temin edilmiştir. Üretime entegrasyonu ve kullanılma süreci selüloz ile aynı şekildedir.

3.1.6. Atık cam

Çalışmada kullanılan atık cam yeşil meşrubat şişelerinden elde edilmiştir. Toplanan meşrubat şişeleri endüstriyel boyutlu üretimde kullanılmakta olan Hatschek prosesi simüle edilmeye çalışılarak kırılmış, öğütülmüş ve elenmiştir.

3.2. Atık Cam Agregası Hazırlama

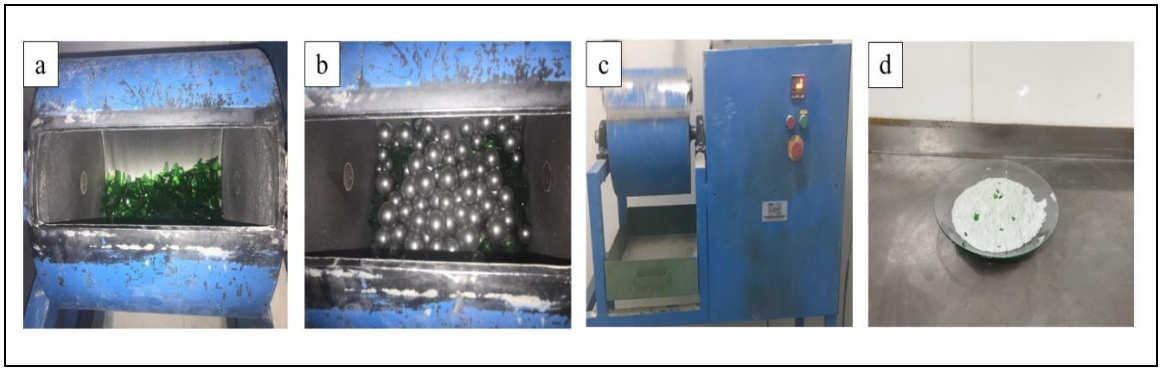
Temin edilen meşrubat şişeleri ilk olarak yüzeylerindeki ambalajların giderilmesi amacıyla yıkama işleminden geçmiştir (Resim 3.1a). Temizlenen şişeler kırılarak bilyalı değirmene beslenmiştir (Resim 3.1b). Bu aşamada, bilyalı değirmenin devrine göre atık camın geldiği boyut aralığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bilyalı değirmende her defasında 1 kg atık camın öğütme işlemi gerçekleştirilmiş (Resim 3.2) ve ardından elde edilen atık cam için 212 mikron, 90 mikron, 63 mikron ve 38 mikronluk eleklere göre kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin ardından devir sayısına karşılık atık camın boyut aralığı

belirlendiğinden sonraki öğütme işlemlerinde de bu kalibrasyon değerleri kullanılmıştır. Kalibrasyon tablosu EK-1'de sunulmuştur.

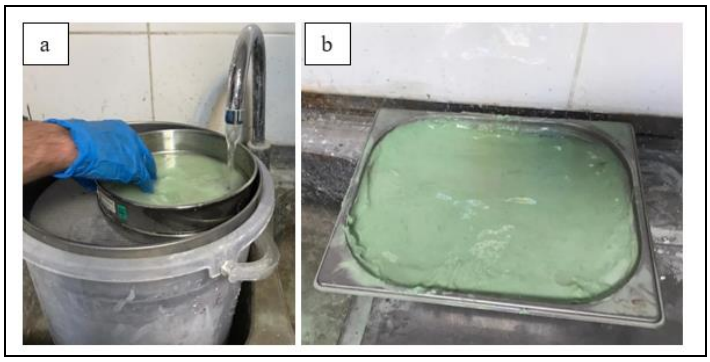


Resim 3.1. Yıkama işleminden geçirilip kırılmış meşrubat şişeleri (a), kırılmış atık cam numunesi (b)

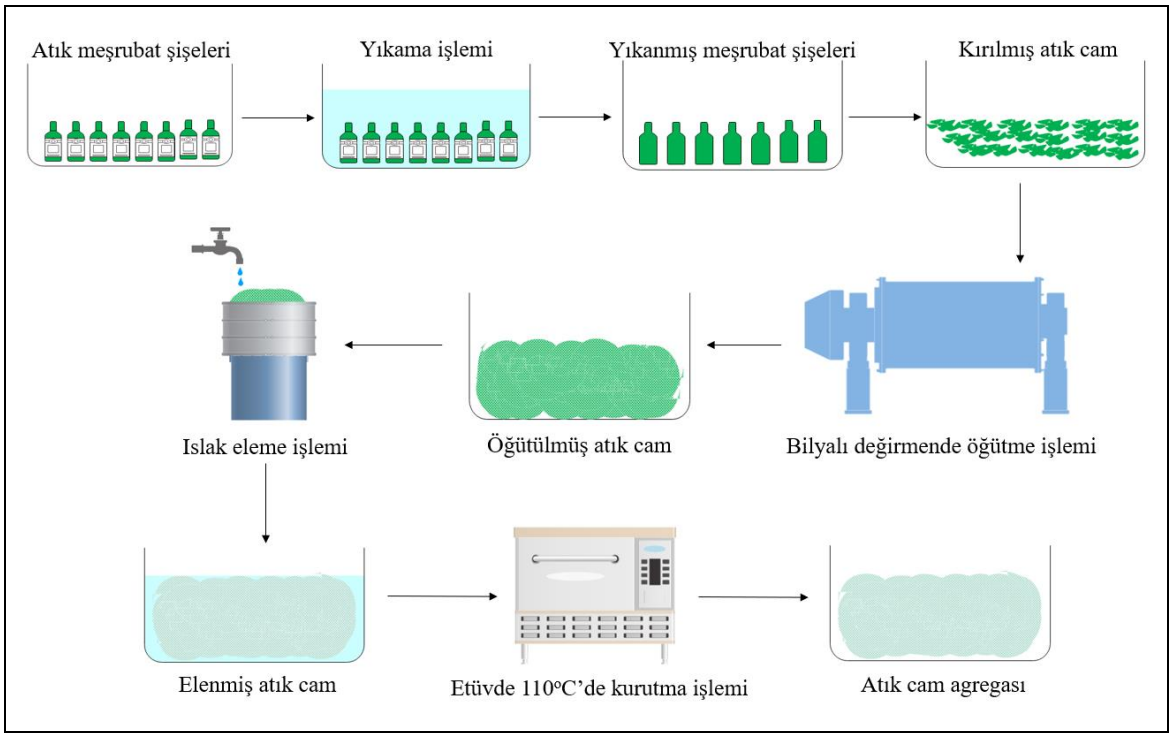
Öğütülen atık camları istenilen boyut aralığına getirmek için eleme işlemine ihtiyaç duyulmuştur. Eleme işleminde ASTM E11 ve TS 1225 ISO 565 standartlarına uygun elekler kullanılmıştır [104-105]. Atık camın partikül boyutu azaldıkça topaklanma durumu meydana gelmiştir. Bu durum, kuru eleme işleminde atık camların istenilen boyut aralıklarına ayrıştırılamayacağı anlamına gelmiştir. Topaklanmayı önlemek için atık camlar ıslak eleme yöntemiyle elenmiştir (Resim 3.3). Ardından karışım içerisinde dibe çökmüş olan atık cam birikintisi etüvde 110°C'de kurutularak nemi uzaklaştırılmıştır. Tüm bu aşamaların ardından istenilen boyut aralığında elde edilmiş olan atık camın Mastersizer E3000 cihazında partikül boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Atık cam agregası hazırlama işlemleri diyagramı Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Resim 3.2. Öğütülmeye hazır atık cam kırıkları (a), değirmen içerisindeki bilyalar (b), bilyalı değirmen (c) ve öğütülmüş atık cam numunesi (d)



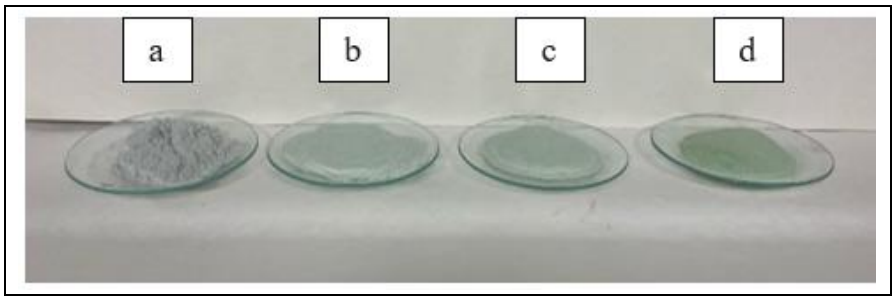
Resim 3.3. Islak eleme işlemi (a) ve etüve konulmaya hazır atık cam numunesi (b)



Şekil 3.2. Atık cam agregası hazırlama işlemleri

3.3. Atık Cam Agregası Karakterizasyonu

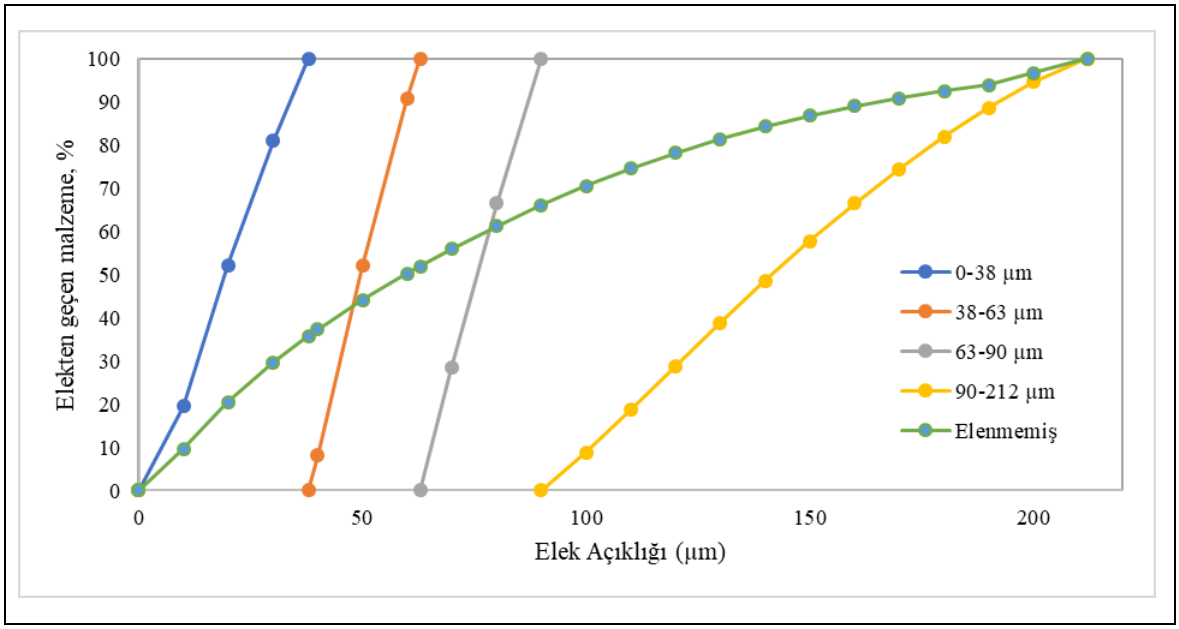
Farklı boyut aralıklarında elde edilen atık cam numuneleri Resim 3.4'te verilmiştir. Ayrıca, bu 4 farklı partikül boyutu aralığındaki atık cam numunelerinin boyut dağılımı Çizelge 3.3'te ve elek analizi deneyi sonuçları Şekil 3.3'te verilmiştir.



Resim 3.4. Atık cam numuneleri; (a) 0-38 µm, (b) 38-63 µm, (c) 63-90 µm, (d) 90-212 µm

Çizelge 3.3. Atık cam agregası partikül boyutu dağılımı

	D_{10} (µm)	D_{50} (µm)	D_{90} (µm)
0-38 µm	7,21	22,71	33,46
38-63 µm	41,88	47,74	57,24
63-90 µm	66,45	76,43	86,12
90-212 µm	104,39	150,91	199,73



Şekil 3.3. Atık cam agregası elek analizi deneyi sonuçları

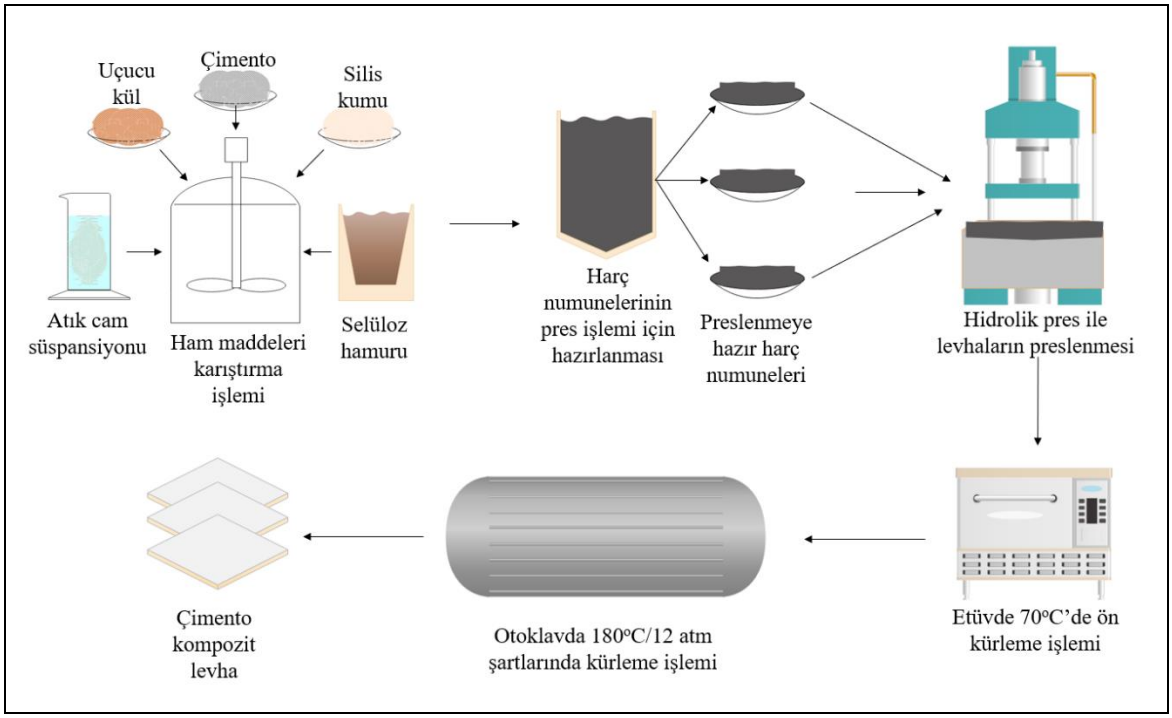
Çalışmada kullanılan atık camın XRF analizi gerçekleştirilememiştir fakat aynı tipte atık cam kullanılan başka bir araştırmadaki sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Atık cam agregası kimyasal kompozisyonu [106]

Bileşen	İçerik oranı, %
SiO_2	66,0-75,0
Al_2O_3	0,7-7,0
Fe_2O_3	0,3
CaO	6,0-12,0
MgO	0,1-5,0
Na_2O	12,0-16,0
K_2O	0,1-3,0

3.4. Çimento Kompozit Levha Numunesi Üretimi

Çimento kompozit levha üretimi, çimento, uçucu kül, silis kumu, selüloz ve atık cam kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te üretim diyagramı sunulmuştur.



Şekil 3.4. Çimento kompozit levha üretim aşamaları

Öncelikle, lif kaynağı olarak kullanılacak selüloz hamurunun serbestlik derecesinin ve konsantrasyonunun sırasıyla TS EN ISO 5267-1 ve TS 8307 EN ISO 41119 standartlarına göre tespit edilmesi gerekmektedir [107-108]. Elyaflarına açılmış selüloz hamuru süspansiyonundan, darası alınmış 46,6 ml'lik numune kabına deney numunesi alınır ve

ağırlığı tartılarak kaydedilir. Alınan selüloz hamuru numunesi temiz bir ölçme silindirine aktarılarak 1000 ml'ye saf su ile tamamlanır. Numune, boş bulunan diğer ölçme silindirine aktarılır ve bu işlem üç kez tekrar edilerek homojenlik sağlanır. Schopper-Riegler (SR) cihazının süzme bölümü huninin ağız kısmına yerleştirilir. Ardından, konik conta kapalı getirilir ve SR ölçme silindiri yan deliğin altına yerleştirilir. Numune süzme bölümüne hızlı bir şekilde fakat sarsmadan dökülür. Bir girdap oluşumundan kaçınmak için akıntı, şafta ve konik contanın kanatlarına karşı yönlendirilir. Bütün selüloz hamuru süspansiyonu döküldükten sonra konik conta 5 saniye için kaldırılır. Silindirin yan deliğinden daha fazla su damlamadığında, ölçme silindiri üzerindeki SR sayısı, bir SR birimi (^{o}SR) yaklaşımıyla okunur. Bu deney 3 kez tekrarlanır ve ortalama değeri kaydedilir. Selüloz hamuru konsantrasyonunu tayin etmek için ise SR cihazının süzme kısmında biriken selüloz lifleri önceden tartılarak ağırlığı kaydedilmiş süzgeç kağıdına aktarılır. Ardından bu atık kağıt hamuru ve lif numunesi 110°C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Ardından, üç analiz sonucunun ortalaması alınarak kaydedilir. Selüloz hamuru konsantrasyonu Eş. 3.1 ile hesaplanır.

$$\%S_k = \frac{m_1}{m_2} \text{ x } 100 \qquad (3.1)$$

Burada;

S_k: Selüloz hamuru konsantrasyonu (%)

m_1: 46,6 ml'lik numune kabına alınan selüloz hamuru numunesi ağırlığı (g)

m_2: Kurutulmuş haldeki selüloz hamuru numune ağırlığı (g)

Reçete karışımını hazırlamak için katı yüzdesine göre eklenecek sulu selüloz hamurunun ağırlığı hesaplanır ve gerekli miktar karıştırma kabına konulur. Selüloz hamurunun üzerine silis kumu eklenerek 2 dakika boyunca homojen hale gelene kadar el mikseri ile karıştırılır. Ardından, ayrı bir karıştırma kabında atık cam 1000 ml su kullanılarak süspansiyon haline getirilerek homojenleştirilir ve karıştırma kabına dökülür. Karışım 5 dakika boyunca homojen hale gelene kadar el mikseri ile karıştırılır. Son olarak, çimento karıştırma kabına alınarak 2 dakika boyunca karıştırılır. Son karışımın homojenliği kontrol edildikten sonra üç eşit parçaya bölünerek ayrı kaplara alınır.

Her numune hidrolik pres cihazının 25x25 cm ebatlarındaki kalıbına dökülür ve el ile her yöne yayılması sağlanır. Sonrasında kalıbın kapağı kapatılarak tüm yüzeye eşit dağılması

için vibrasyon işlemi yapılır. Sonrasında 90 kg/cm^2 basınç altında 1 dakika boyunca preslenir. Pres kalıbından alınan preslenmiş numuneler 70°C sıcaklıkta 9 saat boyunca etüvde ön kürleme işlemine maruz bırakılır. Son olarak, levhalar hidratasyon reaksiyonu şartlarının sağlanması için otoklavda 180°C/12 atm şartlarında 15 saat boyunca kürlenmeye bırakılır.

Numunelerin isimlendirilmesi sırasıyla Çizelge 3.5'te ve Çizelge 3.6'da verilmiştir. Çizelge 3.5'te verilen isimlendirmede AH kısaltması atık kağıt hamuru için kullanılırken, Çizelge 3.6'daki AC kısaltması ise atık cam agregası için kullanılmıştır. AH veya AC ifadelerinin yanındaki sayı ikame oranını temsil etmektedir. Son olarak, AC ifadesinin yanında kullanılan A; B; C ve D harfleri kullanılan atık camın partikül boyutu aralığını temsil etmektedir.

Çizelge 3.5. Atık kağıt hamuru reçeteleri

Selüloz İkamesi, %				
10	20	30	40	50
AH-10	AH-20	AH-30	AH-40	AH-50

Çizelge 3.6. Atık cam agregası reçeteleri

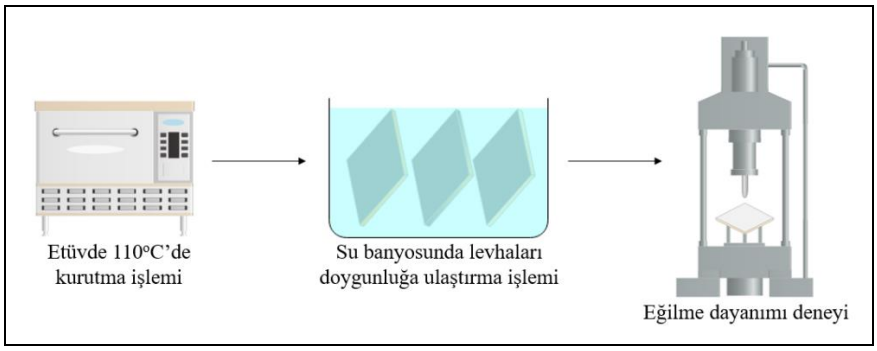
		Agrega İkamesi, %		
		10	20	50
Boyut, (μm)	0-38	AC-A-10	AC-A-20	AC-A-50
	38-63	AC-B-10	AC-B-20	AC-B-50
	63-90	AC-C-10	AC-C-20	AC-C-50
	90-212	AC-D-10	AC-D-20	AC-D-50

3.5. Çimento Kompozit Levhalara Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler

Üretimi tamamlanmış levhaların mekanik ve fiziksel özellikleri TS EN 12467 standardına göre tespit edilir. Otoklav çıkışı oda sıcaklığına soğutulan levhaların tüm kenarlarının iki köşesinden levha kalınlıkları kumpas yardımıyla ölçülür ve ortalaması alınır. Ardından, levhalar 110°C sıcaklıkta kurutularak nem uzaklaştırılır. Nemi sıfırlanmış levhaların ağırlıkları alınır. Su banyosuna konulan ve 24 saat suda bekletilen levhaların ağırlıkları

alınır. Sonraki aşamada ise 24 saat suda bekletilerek suya doygun hale getirilmiş levhalar Arşimet terazisinde tartılır. Son aşamada levhaların eğilme dayanımı analizi yapılır. Kırım için numunelerin alt yüzleri mesnetlere oturacak şekilde ortalanır. Merkeze yerleştirilmiş yükleme çubuğu ile numunelerin 20-30 saniye arasında kırılması sağlanacak şekilde yük uygulanır. Ekrandan kırılma yükü okunur ve kaydedilir. Aynı işlem diğer eksen için de uygulanır ve sonuçlar kaydedilir.

Şekil 3.5'te numunelere fiziksel ve mekanik test aşamalarında uygulanan işlemler sunulmuştur.



Şekil 3.5. Fiziksel ve mekanik test aşamaları

Çimento kompozit levha numunelerinin su emme oranı, yoğunluk, gözeneklilik ve eğilme dayanımı değerleri sırasıyla Eş. 3.2; Eş. 3.3; Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Su emme oranı} = \frac{m_B - m_A}{m_A} \text{ x } 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Yoğunluk} = \frac{m_A}{(m_B - m_C)} \text{ x } \rho_{su} \quad (3.3)$$

$$\% \text{ Açık Gözeneklilik} = \frac{m_B - m_A}{m_B - m_C} \text{ x } 100 \quad (3.4)$$

Burada;

m_A: Nemi sıfırlanmış levhanın ağırlığı (g);

m_B: 24 saat suda bekletilmiş levhanın ağırlığı (g);

m_C: Suya doygun hale getirilmiş levhanın Arşimet terazisindeki ağırlığı (g).

$$\text{Eğilme Dayanımı, MPa (MOR)} = \frac{3 \times F \times I_s}{2 \times b \times e^2} \quad (3.5)$$

Burada;

F: kırılma yükü (N);

I_s: mesnet düşey eksenleri arasındaki açıklık (mm);

b: numune genişliği (mm);

e: numune kalınlığı (mm).

3.6. Çimento Kompozit Levhalara Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler

Üretilen çimento kompozit levha numunelerinin yüzey morfolojisini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Çalışmada, QUANTA 400F Field Emission marka SEM cihazı kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu, 1.2 nm çözünürlüktedir. Çimento kompozit levha numunelerinin yüzeyleri, elektron ışıması sırasında yük birikmesini önlemek ve olası hasarları engellemek amacıyla plazma püskürtme aparatı kullanılarak nano boyutlu ince bir altın tabaka ile kaplanmıştır.

3.7. İstatistiksel Analiz

Çalışmada yapılan atık cam partikül boyutu ve ikame oranı değişimlerinin çimento kompozit levhaların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi istatistiksel analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında, İki Yönlü ANOVA Testi ile atık cam partikül boyutu ve ikame oranı değişimiyle elde edilen çimento kompozit levhaların mekanik ve fiziksel özelliklerine ait deneysel sonuçlar JMP programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Eğilme dayanımı, yoğunluk, su emme oranı ve gözeneklilik sonuçları için deneysel çalışmalarla iki bağımsız değişken (atık cam partikül boyutu ve ikame oranı) ve bir bağımlı değişken dikkate alınmıştır. Yöntemde öncelikli olarak F testi yapılmıştır. F testinin önemli çıkması sonucu (hipotezin reddedilmesi durumu) karşılaştırma testi olarak Asgari Önemli Fark (AÖF, Least Significant Difference, LSD) kullanılmıştır. Atık cam partikül boyutu ve ikame oranı değişiminin çimento kompozit levhaların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve bulguları kendi içinde yorumlamak için MSTATC istatistik programı kullanılmıştır. Bu aşamada ortalamalar AÖF testi ($P<0,05$) ile

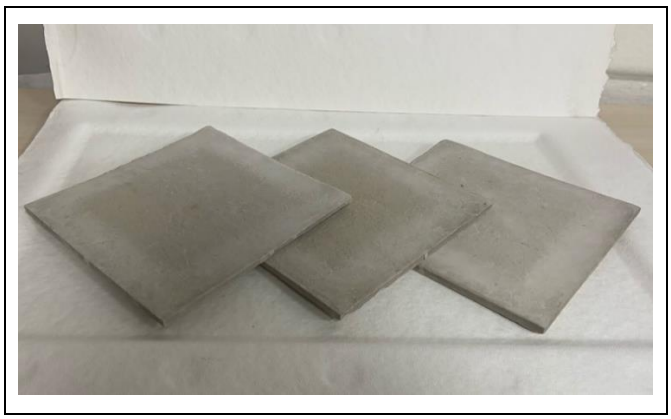
sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı atık cam partikül boyutu ve ikame oranı ile çimento kompozit levhaların her bir özelliği için ortalama değerlerini en yüksekten en düşüğe doğru istatiksel olarak sırasıyla A, B, C ve D şeklinde sıralamıştır.

3.8. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Üretimi tamamlanan çimento kompozit levhaların çevresel etkisini tespit etmek için YDD yapılmıştır. Sonuçlar, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda incelenerek değerlendirilmiştir [89-90]. OpenLCA v2.0 yazılımı kullanılarak, üretimi tamamlanmış olan çimento kompozit levhaların başta küresel ısınma potansiyeli ve kümülatif enerji talebi olmak üzere çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın yapılabilmesi için ham maddelerin detaylı teknik bilgisi; üretim sahasına taşınma yöntemi, miktarı ve sıklığı bilgisi; enerji ve su gibi kullanılan yardımcı kaynaklara ait tür ve miktar bilgisi gerekmektedir. Ayrıca, ürünün inşa basamağında yer alan taşınma ve kurulum; kullanım basamağında yer alan kullanım, bakım, onarım, değiştirme, yenileme, enerji tüketimi ve su tüketimi; yaşam sonu basamağında yer alan sökme/yıkma, taşınma, işleme ve bertaraf aşamaları hakkında da bilgiye ihtiyaç vardır. Fakat, bu aşamalarda farklı iklim koşulları, kullanım süresi ve bertaraf yöntemleri nedeniyle kaliteli ve net verilere ulaşmak oldukça zordur. Bu nedenle YDD çalışması en sağlıklı veri kalitesine sahip olunan "beşikten kapıya" yaklaşımıyla yürütülmüştür. Bu yaklaşımda ürün basamağında bulunan ham madde temini, ham maddelerin taşınması ve üretim aşamaları bulunmaktadır. YDD çalışmasında öncelikle birim fonksiyon seçilmelidir. Levhaların değişen kalınlık, en ve boy özellikleri nedeniyle birim fonksiyon 1 m^3 olarak seçilmiştir. Bu yöntemde, Tepe Betopan şirketinin 2022 boyunca gerçekleştirdiği ham madde tüketimi; tedarikçi firmaların mesafelerine göre değişen taşınma verileri; doğal gaz, elektrik ve su gibi yardımcı kaynak kullanımı verileri baz alınarak Ecoinvent v3.7 veritabanı aracılığı ile çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca, çalışmada kullanılan atık cam lokal kaynaklardan temin edildiği için uzaklık olarak 50 km'lik bir mesafe alınmıştır. YDD çalışması sonuçları Impact2002+ yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Yüksek lisans tez çalışmasında, ilk olarak atık kağıt hamuru farklı oranlarda reçetede kullanılmakta olan selüloza ikame edilerek çimento kompozit levhalar üretilmiştir. Sonrasında, atık cam reçetede agrega olarak yer alan silis kumuna farklı oranlarda (%10, %20 ve %50) ve farklı partikül boyutlarında (0-38 µm, 38-63 µm, 63-90 µm ve 90-212 µm) ikame edilerek çimento kompozit levha üretimi tamamlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için analizler yürütülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler, ilk aşamada üretilen levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri; istatistiksel analiz; ikinci aşamada üretilen levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri; SEM karakterizasyon sonuçları ve yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları olmak üzere beş başlık halinde sunulmuştur. Resim 4.1'de üretilen çimento kompozit levha örnekleri sunulmuştur.



Resim 4.1. Üretilen çimento kompozit levhalar

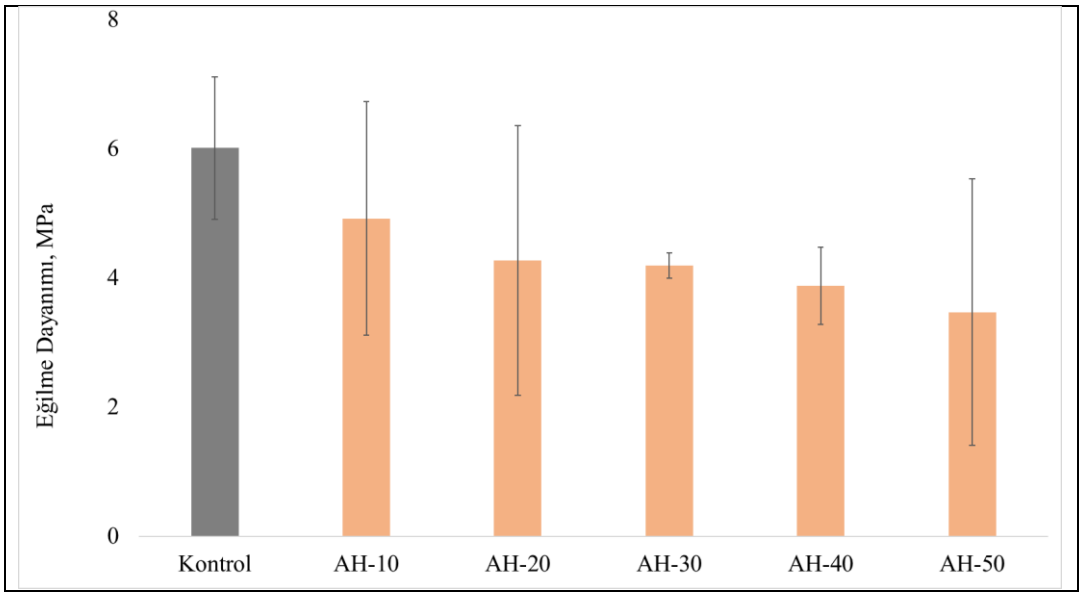
4.1. İlk Aşamada Üretilen Levhaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Farklı atık kağıt hamuru oranlarına sahip numunelerin üretimi gerçekleştirilmiş ve devamında fiziksel ve mekanik test sonuçları yorumlanarak atık kağıt hamuru için en uygun ikame oranı tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonraki aşamada ise farklı partikül boyutu ve oranındaki atık camların kullanılmasıyla üretimi tamamlanan çimento kompozit levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri yorumlanmıştır. İlk aşamada her bir partikül boyut aralığında (0-38 µm, 38-63 µm, 63-90 µm ve 90-212 µm) ve farklı oranlarda (%10, %20 ve %50) atık cam eklenerek üretilen levhanın eğilme dayanımı, su emme oranı, kuru görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik özellikleri incelenmiştir.

Atık kağıt hamuru ile üretilen levhalara ait mekanik ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 4.1 - 4.2'de ve Şekil 4.1 – 4.5'te sunulmuştur. Bu analiz sonuçlarından eğilme dayanımı, su emme oranı, kuru görünür yoğunluk ve açık gözenekliliğe ait ham veriler EK-2 ve EK-3'te verilmiştir. Atık cam ile üretimi tamamlanan levhalara ait fiziksel ve mekanik analiz sonuçları ise Çizelge 4.3 - Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.5 – 4.8'de verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına ait ham veriler EK-4 - EK-13 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.1. Atık kağıt hamuru ile üretilen çimento kompozit levhalara ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

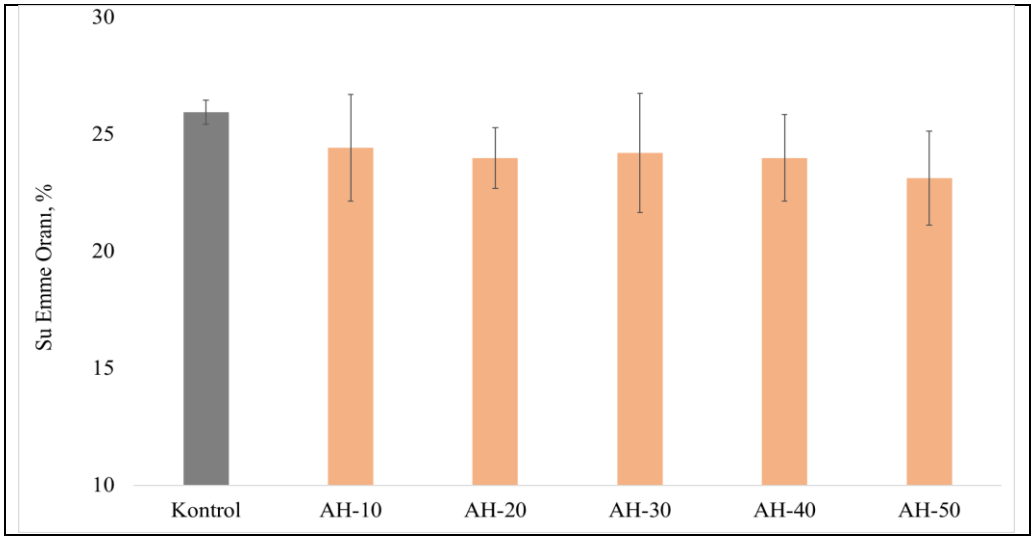
Numune	Eğilme Dayanımı, MPa	Kontrole Göre Değişim, %
Kontrol	6,01	-
AH-10	4,92	-18,1
AH-20	4,27	-29,0
AH-30	4,19	-30,3
AH-40	3,88	-35,4
AH-50	3,47	-42,3



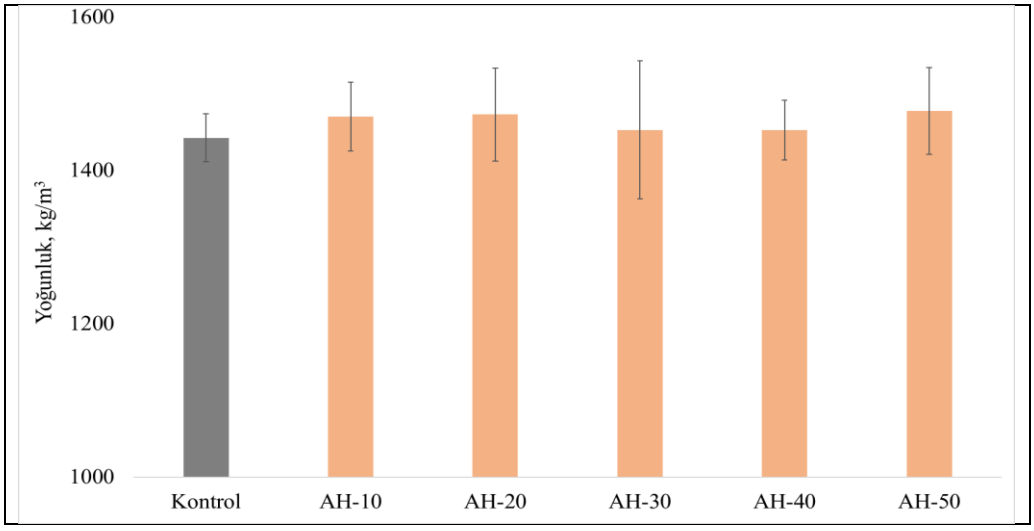
Şekil 4.1. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

Çizelge 4.2. Atık kağıt hamuru ile üretilen çimento kompozit levhalara ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

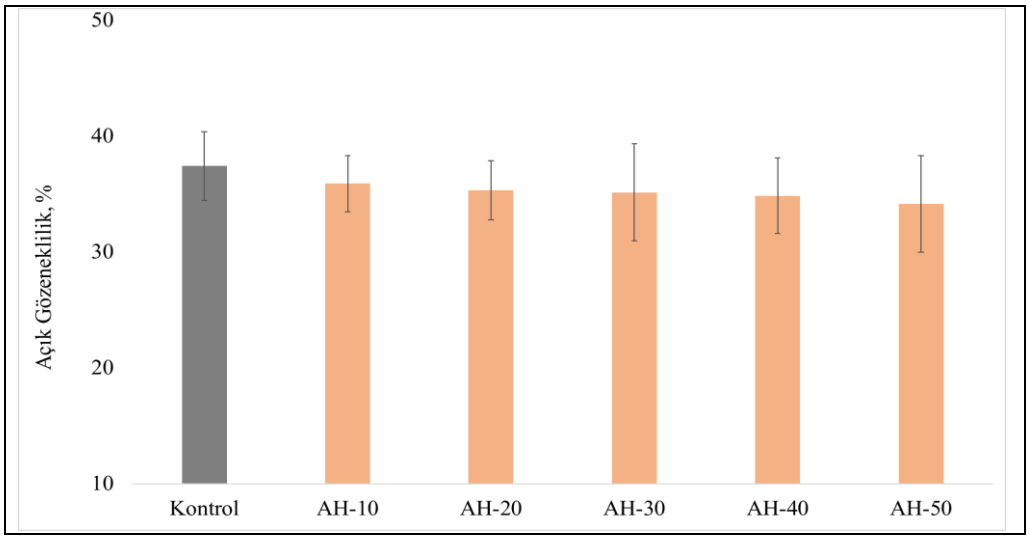
Numune	Su Emme Oranı, %	Kontrole Göre Değişim, %	Yoğunluk, kg/m^3	Kontrole Göre Değişim, %	Açık Gözeneklilik, %	Kontrole Göre Değişim, %
Kontrol	25,93	-	1443	-	37,41	-
AH-10	24,42	-5,8	1470	1,9	35,89	-4,1
AH-20	23,98	-7,5	1473	2,1	35,32	-5,6
AH-30	24,21	-6,6	1453	0,7	35,13	-6,1
AH-40	23,99	-8,2	1452	0,6	34,85	-6,8
AH-50	23,12	-10,8	1478	2,4	34,15	-8,7



Şekil 4.2. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri



Şekil 4.3. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri

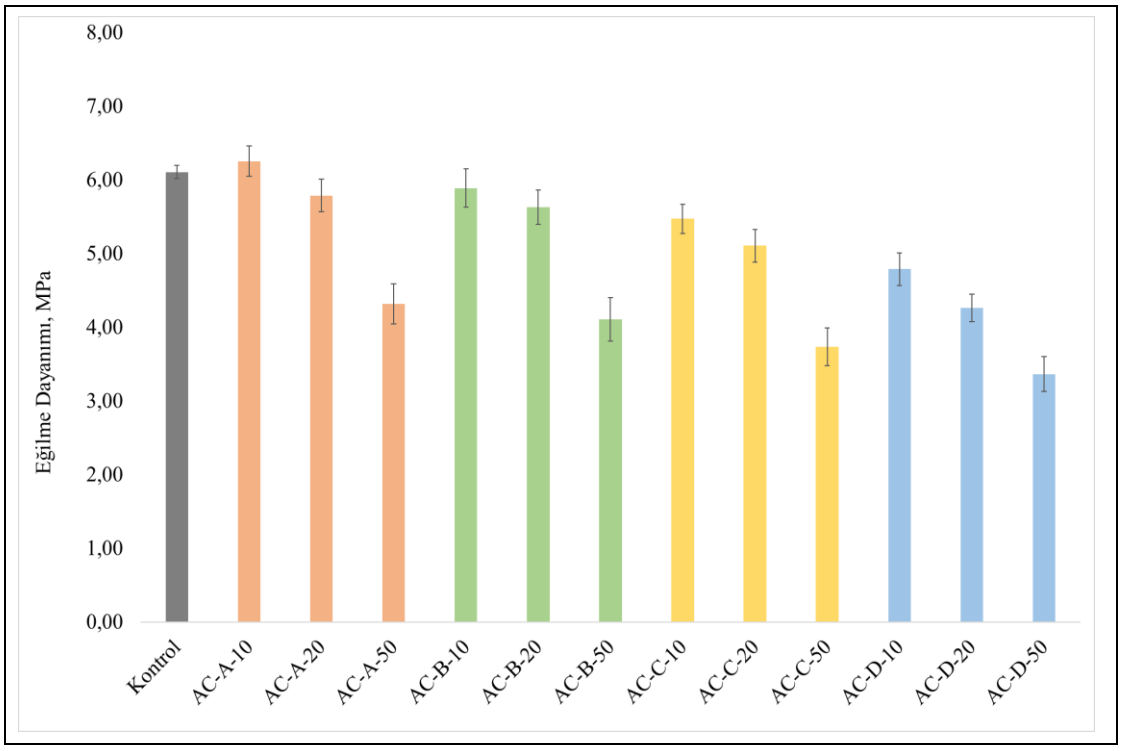


Şekil 4.4. Atık kağıt hamuru reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri

%10; %20; %30; %40 ve %50 atık kağıt hamuru ikame oranına sahip olarak elde edilen çimento kompozit levhaların mekanik özellikleri yorumlandığında, eğilme dayanımları sırasıyla 4,92; 4,27; 4,19; 3,88 ve 3,47 N/mm^2 olarak bulunmuştur. Çalışmada TS EN 12467 standardına göre tespit edilen eğilme dayanımı değerleri atık kağıt hamuru ikame oranı arttıkça sırasıyla %18,1; %29,0; %30,3; %35,4 ve %42,3 oranlarında azalmıştır. %10; %20; %30; %40 ve %50 atık kağıt hamuru ikame oranı ile üretilen levhaların fiziksel özelliklerine bakıldığında atık kağıt hamuru oranı arttıkça su emme oranının ve açık gözenekliliğin de genel olarak azaldığı görülmüştür. Yoğunluk değerinde ise atık kağıt hamuru ikame oranı ile genel olarak paralel bir artış olduğu söylenebilir. Çalışma kapsamında deneysel test sonuçlarıyla elde edilen değerlerin standart değerden (<%25) daha küçük olduğu görülmüştür. Ancak eğilme dayanımındaki düşüşle birlikte levhaların istenilen seviyede mekanik performans gösteremeyeceği de tespit edilmiştir. Açık gözeneklilik oranının ikame oranı arttıkça azalması su emme oranı sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Bu durum atık kağıt hamurunun ham selülozdan daha kısa liflere sahip olması ve bu nedenle daha düşük ^{o}SR değerine sahip olmasıyla açıklanabilir. Bunun sonucunda atık kağıt hamuru karışım içerisinde istenilen derecede lif açıklığıyla dağılamamış ve kompozit yapının zayıflamasına sebep olmuştur. Sonuç olarak, levhanın eğilme dayanımı iç yapıdaki bağ zayıflaması sebebiyle atık kağıt hamuru miktarı yükseldikçe düşüş göstermiştir. Lif kısalığı ve düşük ^{o}SR nedeniyle gözenekli yapıda azalma meydana gelmiş ve su emme oranı ile açık gözeneklilik değerinde atık kağıt hamuru miktarı ile doğru orantılı düşüş gözlemlenmiştir [18-21].

Çizelge 4.3. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Kontrol Numunesine Göre Değişim, %
Kontrol	6,11	-
AC-A-10	6,26	2,5
AC-A-20	5,79	-5,2
AC-A-50	4,32	-29,3
AC-B-10	5,89	-3,6
AC-B-20	5,63	-7,9
AC-B-50	4,11	-32,7
AC-C-10	5,47	-10,5
AC-C-20	5,11	-16,4
AC-C-50	3,74	-38,8
AC-D-10	4,79	-21,6
AC-D-20	4,27	-30,1
AC-D-50	3,37	-44,8



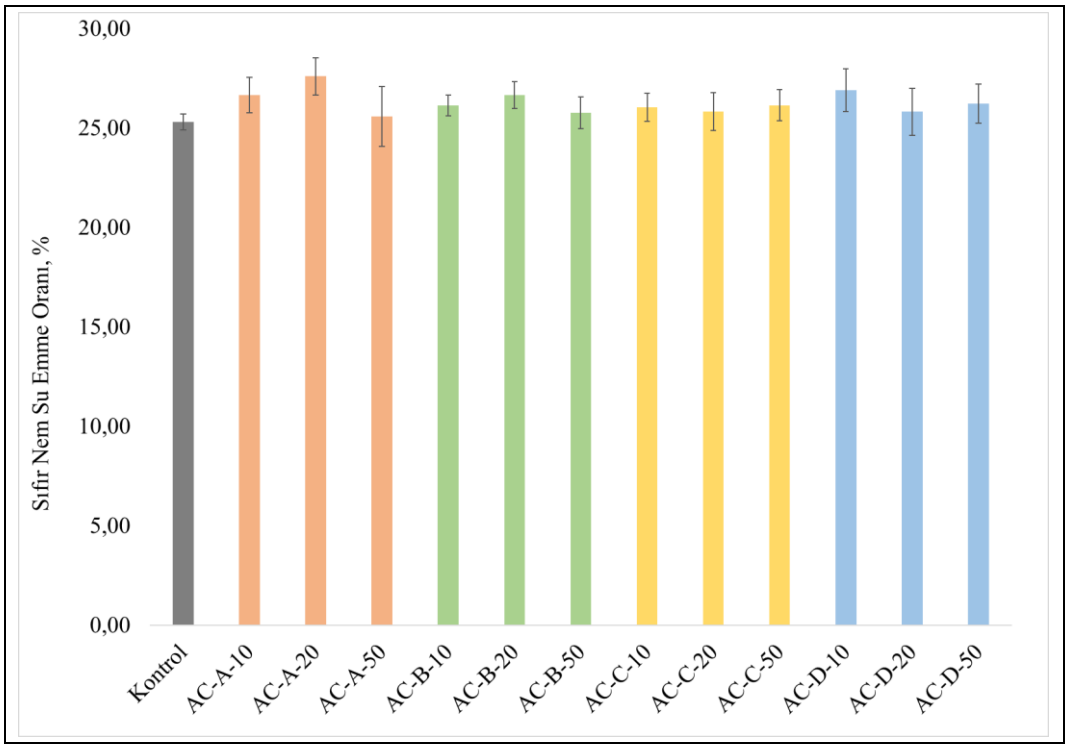
Şekil 4.5. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

Atık cam kullanılarak üretilen çimento kompozit levhaların mekanik özellikleri dikkate alındığında partikül boyut aralığı ve ikame oranı arttıkça eğilme dayanımının düştüğü görülmüştür. Deney sonuçları doğrultusunda kontrol numunesinden daha yüksek eğilme dayanımına sahip numune AC-A-10 numunesi olup, ilgili değer kontrol numunesinin

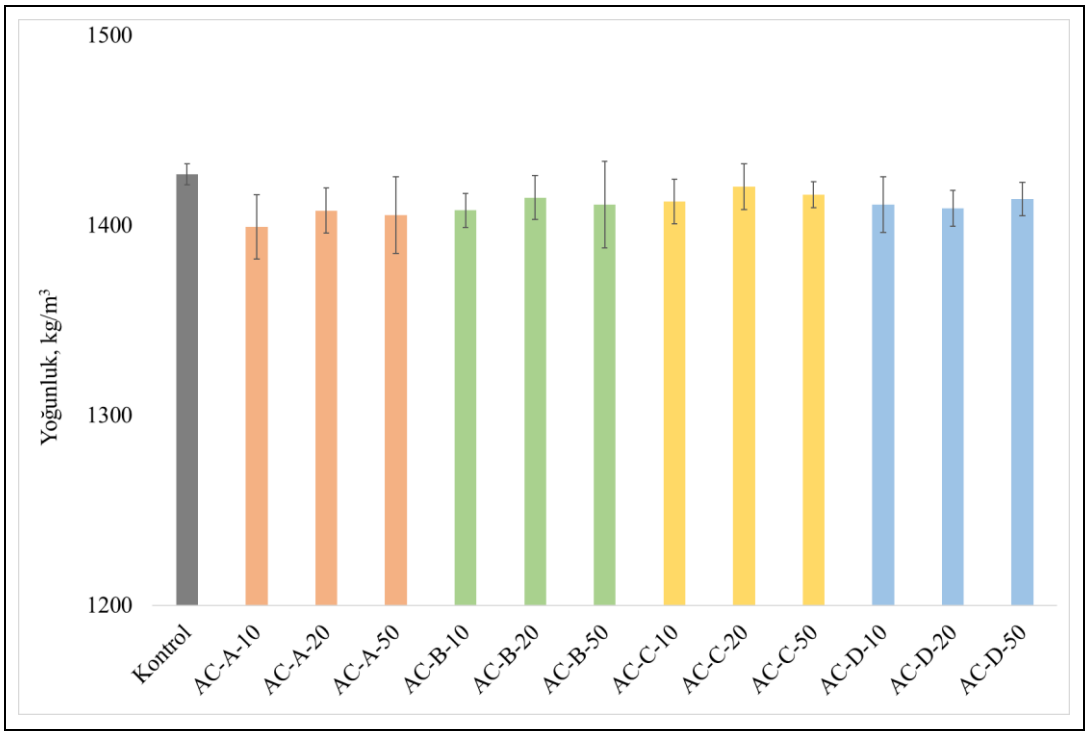
değerine göre %2,5 daha yüksektir. Ayrıca, AC-B-10, AC-A-20 ve AC-B-20 numuneleri de kontrol numunesine yakın sonuçlar vermiştir. Bu değerler kontrol numunesine göre sırasıyla %3,6; %5,2 ve %7,9 daha düşüktür. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre, atık cam parçacık boyutunun puzolanik reaktivitenin artmasından sorumlu olan önemli bir faktör olduğu söylenebilir. Ek olarak, daha büyük miktardaki ara yüzey alanı göz önüne alındığında daha küçük parçacıklar puzolanik reaksiyonları artırabilir çünkü reaksiyonun ilerlemesi yüzey alanı ile doğru orantılıdır [35-39, 49, 54, 100, 109-110]. Eğilme dayanımındaki azalmanın aynı zamanda ara yüzeydeki adhezyonun azalmasından ve cam partiküllerindeki mikro çatlamadan da kaynaklandığı yorumu yapılabilir [34, 45, 48-49, 109-110].

Çizelge 4.4. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

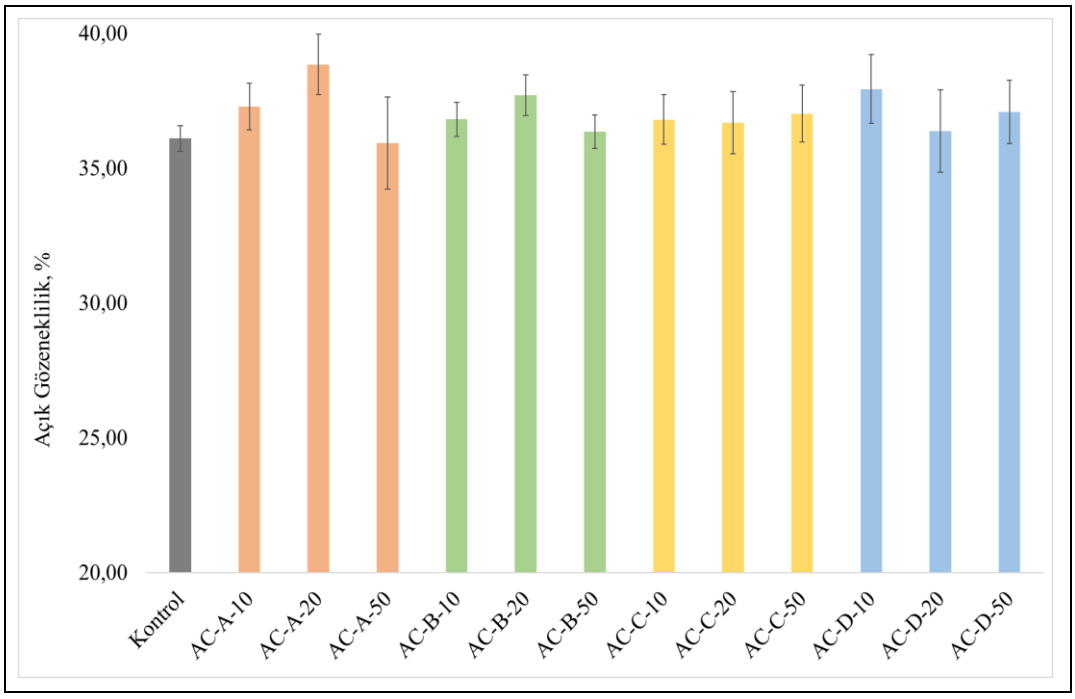
Numune	Su Emme Oranı, %	Kontrole Göre Değişim, %	Yoğunluk, kg/m^3	Kontrole Göre Değişim, %	Açık Gözeneklilik, %	Kontrole Göre Değişim, %
Kontrol	25,32	-	1427	-	36,11	-
AC-A-10	26,67	5,3	1408	-1,3	37,30	3,3
AC-A-20	27,61	9,0	1399	-2,0	38,86	7,6
AC-A-50	25,60	1,1	1415	-0,8	36,29	0,5
AC-B-10	26,16	3,3	1415	-0,8	36,82	2,0
AC-B-20	26,66	5,3	1408	-1,3	37,71	4,4
AC-B-50	25,79	1,9	1421	-0,4	36,36	0,7
AC-C-10	26,06	2,9	1413	-1,0	36,81	1,9
AC-C-20	25,85	2,1	1420	-0,5	36,70	1,6
AC-C-50	26,15	3,3	1406	-1,5	37,04	2,6
AC-D-10	26,91	6,3	1411	-1,1	37,95	5,1
AC-D-20	25,83	2,0	1419	-0,6	36,39	0,8
AC-D-50	26,25	3,7	1414	-0,9	37,10	2,7



Şekil 4.6. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri



Şekil 4.7. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri



Şekil 4.8. İlk aşama atık cam reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri

Çimento kompozit levhaların fiziksel özellikleri incelendiğinde, en düşük su emme oranının kontrol numunesinden elde edildiği görülmüştür. Sonrasındaki en yüksek ve en düşük değerlere sahip numuneler olan AC-A-20 ve AC-A-50 numunelerinin kontrol numunesine göre değişim oranları sırasıyla %9,0 ve %1,1 seviyelerindedir. Genel kapsamda incelendiğinde su emme oranlarında önemli bir değişim görülmemiştir. Fakat sonuçların partikül boyutuna veya ikame oranına göre de bir doğrusallık göstermediği de tespit edilmemiştir. Her bir partikül boyut aralıkları ayrı ele alındığında %50 atık cam ikame oranına sahip olan numunelerin genel olarak %10 atık cam ikame oranına sahip numunelerden daha düşük seviyelerde sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu durum, ikame oranı arttıkça atık camların karışım içerisinde higroskopik özelliği nedeniyle homojen şekilde dağılamamasıyla açıklanabilir. Yoğunluk değerlerine bakıldığında en yüksek kuru görünür yoğunluğa sahip numune kontrol numunesi olarak bulunmuştur. Bununla beraber en düşük yoğunluk değerine sahip numune yalnızca %2,0 düşüş gösteren AC-A-20 olmuştur. Sonuçların su emme oranı değerleriyle paralellik gösterdiği görülmüştür. Atık camın partikül boyutu düştükçe yoğunluğun genel olarak düşmesi karışım içerisinde yeni gözeneklerin oluşumuna sebebiyet vermesi ve buna bağlı olarak daha yüksek boşluk hacmi ile sonuçlanmasıyla açıklanabilir [36, 49]. Açık gözeneklilik sonuçları da su emme oranı ve yoğunluk değerleri ile genel olarak paralellik göstermiştir. En düşük sonuç %36,11 ile kontrol numunesinden elde edilmiştir. Sonrasındaki en yüksek ve en düşük değerlere sahip

numuneler olan AC-A-20 ve AC-A-50 numunelerinin kontrol numunesine göre değişim oranları sırasıyla %7,6 ve %0,5 seviyelerindedir. Sonuçlar incelendiğinde A ve B sınıfı atık camların karışım içerisinde %20 oranına kadar homojen şekilde dağılabildiği ve buna bağlı olarak su emme oranı ile açık gözeneklilik değerlerinin artmasına sebep olurken yoğunluğun da düşmesine neden olduğu görülmüştür. %50 ikame oranında ise higroskopik etki nedeniyle homojen dağılım sağlanamadığı ve topaklaşmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, atık camın partikül boyutu düştükçe yoğunluğun genel olarak düşmesi karışım içerisinde yeni gözeneklerin oluşumuna sebebiyet vermesi ve buna bağlı olarak daha yüksek boşluk hacmi ile sonuçlanmasıyla açıklanabilir [36, 38, 43, 48-49].

4.2. İstatistiksel Analiz

İstatistiksel analiz bölümünde ilk aşamada atık camın agregaya ikamesi ile üretimi tamamlanan çimento kompozit levhaların eğilme dayanımı değerleri üzerinden yürütülen istatistiksel analiz sonuçları sunulmuştur. İstatistiksel analizin eğilme dayanımı bulgularına uygulanmasının sebebi su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri kontrol numunesine oranla maksimum %10 oranında değişmesi (bu durum eğilme dayanımında %45 seviyesindedir) ve eğilme dayanımının çimento kompozit levha bazında en kritik özellik olmasıdır. Partikül boyut aralığının ve atık cam ikame oranının eğilme dayanımına etkisini belirlemek için gerçekleştirilen iki yönlü ANOVA testi varyans analizi Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelerin eğilme dayanımını etkileyen varyans analizi sonucu

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	F-Hesap
Partikül Boyut Aralığı	3	22,4582	85,9904**
İkame Oranı	3	97,9061	374,8739**
Partikül Boyut Aralığı x İkame Oranı	9	6,1740	7,8800**
Hata	120	10,4468	
Genel	135	136,9851	

** Partikül boyut aralığı, ikame oranı ve partikül boyut aralığı x ikame oranı interaksiyonu $p<0,01$ düzeyinde anlamlılık göstermiştir.

Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere, farklı partikül boyut aralığının, atık cam ikame oranının ve bu iki parametrenin ortak etkisinin levhaların eğilme dayanımı özellikleri üzerinde ($p<0,01$)

istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu parametrelerin, eğilme dayanımı değerleri üzerindeki önem düzeyini belirleyebilmek amacıyla LSD testi gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı partikül boyut aralığı ve ikame oranındaki cam ile üretilen levhalara ait ortalama eğilme dayanım değerleri

Numune	Partikül Boyut Aralığı, µm	İkame Oranı, %	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa	Standart Sapma
Kontrol	-	-	6,11 [a]	0,26
AC-A-10	0-38	10	6,26 [a]	0,27
AC-A-20	0-38	20	5,79 [b]	0,29
AC-A-50	0-38	50	4,32 [c]	0,35
AC-B-10	38-63	10	5,89 [b]	0,34
AC-B-20	38-63	20	5,63 [b]	0,30
AC-B-50	38-63	50	4,11 [c]	0,39
AC-C-10	63-90	10	5,47 [b]	0,26
AC-C-20	63-90	20	5,11 [c]	0,29
AC-C-50	63-90	50	3,74 [d]	0,33
AC-D-10	90-212	10	4,79 [b]	0,29
AC-D-20	90-212	20	4,27 [c]	0,24
AC-D-50	90-212	50	3,37 [d]	0,31

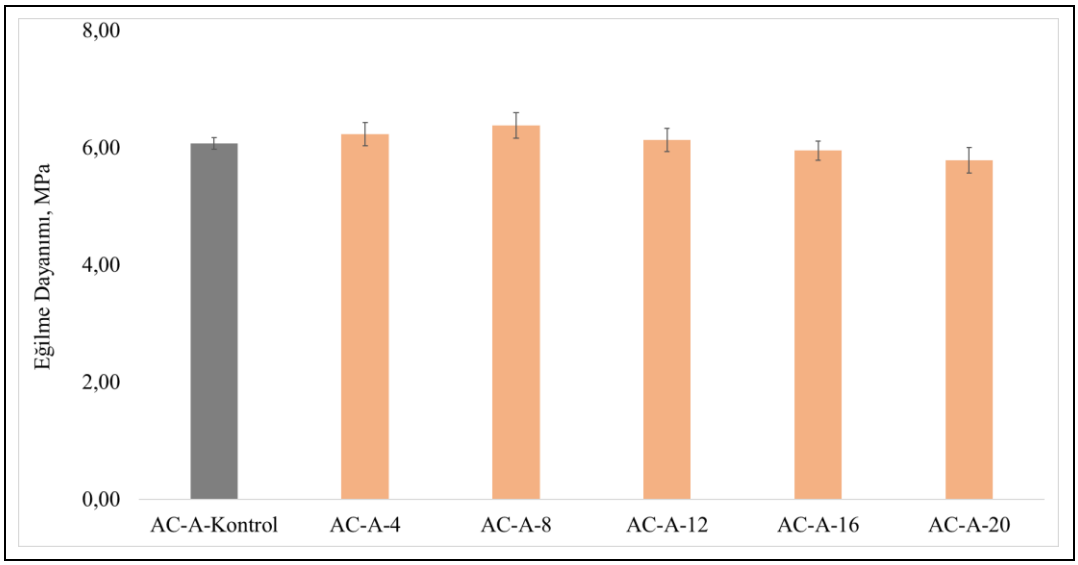
İstatistiksel analiz sonucu elde edilen bulgulara göre A sınıfı atık cam agregasının %10 oranında kullanıldığı durum kontrol numunesi ile beraber en ideal reçeteleri belirtmiştir. Sonrasında AC-A-20, AC-B-10 AC-B-20, AC-C-10 ve AC-D-10 reçeteleri bir alt sınıfta sıralanmışlardır. En alt sınıfta ise eğilme dayanımını kontrol numunesine göre sırasıyla %38,8 ve %44,8 oranında düşüren AC-C-50 ve AC-D-50 reçeteleri bulunmaktadır. Bu bulgular değerlendirildiğinde bir sonraki aşamada en ince atık cam agregasının %10 oranına kadar silis kumuna ikame edilmesi öne çıkmaktadır. Fakat çalışmanın endüstriyel bir ürün gamında yapılması ve çalışma sonucunda endüstriyel ölçekte değerlendirilebilecek olması durumları göz önünde bulundurularak %10 oranının %20'ye kadar genişletilmesine karar verilmiştir. İkinci aşamada yapılan çalışmalarda A sınıfı atık cam agregası %20'ye kadar olan ikame durumunun ürün özelliklerine etkisinin alt kırınımlarını belirlemek için sırasıyla %4; %8; %12 ve %16 oranları belirlenmiştir.

4.3. İkinci Aşamada Üretilen Levhaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

İstatistiksel analiz sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu ikinci aşamada ara kırınımları tespit etmek için üretimi yapılan AC-A-4, AC-A-8, AC-A-12 ve AC-A-16 reçetelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 4.7'de, Şekil 4.9'da ve Çizelge 4.8'de, Şekil 4.10 - 4.12'de sunulmuştur. İkinci aşamada atık cam ile üretilen levhalara ait mekanik ve fiziksel sonuçları analiz sonuçlarından eğilme dayanımı, su emme oranı, kuru görünür yoğunluk ve açık gözenekliliğe ait ham veriler EK-14 ve EK-15'te paylaşılmıştır. Gösterilen kontrol numunesi sonuçları hem bu reçetelerle beraber yapılan hem de öncesinde A sınıfı reçetelerle üretilen kontrol numunesinin ortalaması alınarak bulunmuştur.

Çizelge 4.7. İkinci aşama reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

Numune	Eğilme Dayanımı, MPa	Kontrole Göre Değişim, %
Kontrol	6,08	-
AC-A-4	6,24	2,6
AC-A-8	6,39	5,1
AC-A-12	6,13	0,9
AC-A-16	5,96	-2,0
AC-A-20	5,79	-5,2



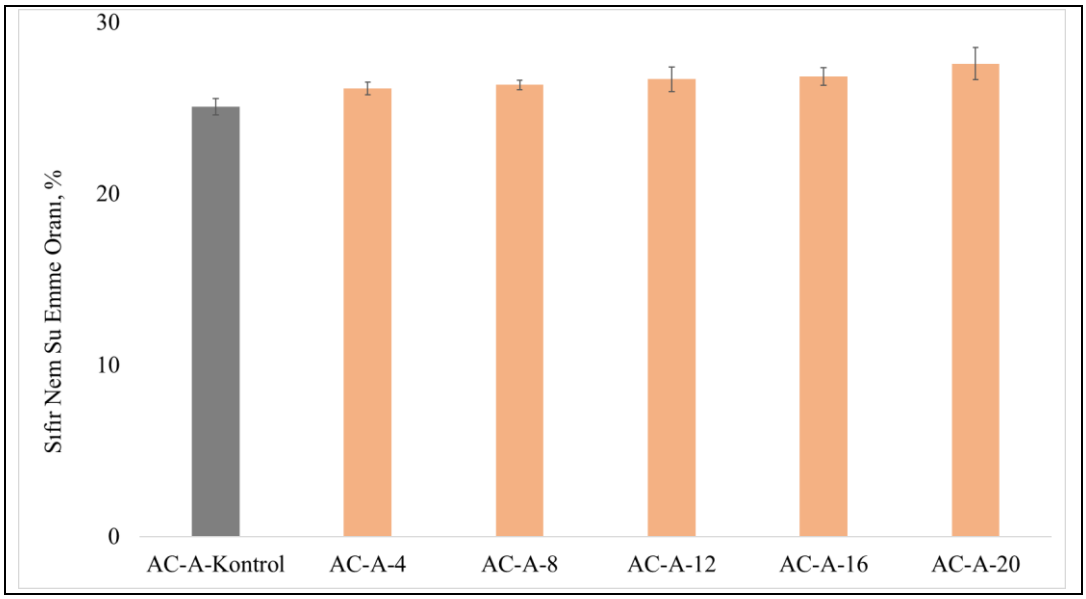
Şekil 4.9. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri

Üretimi tamamlanan levhaların eğilme dayanımı özellikleri incelendiğinde %4; %8 ve %12 ikame oranına sahip numuneler kontrol numunesine göre sırasıyla %2,6; %5,1 ve %0,9 artış

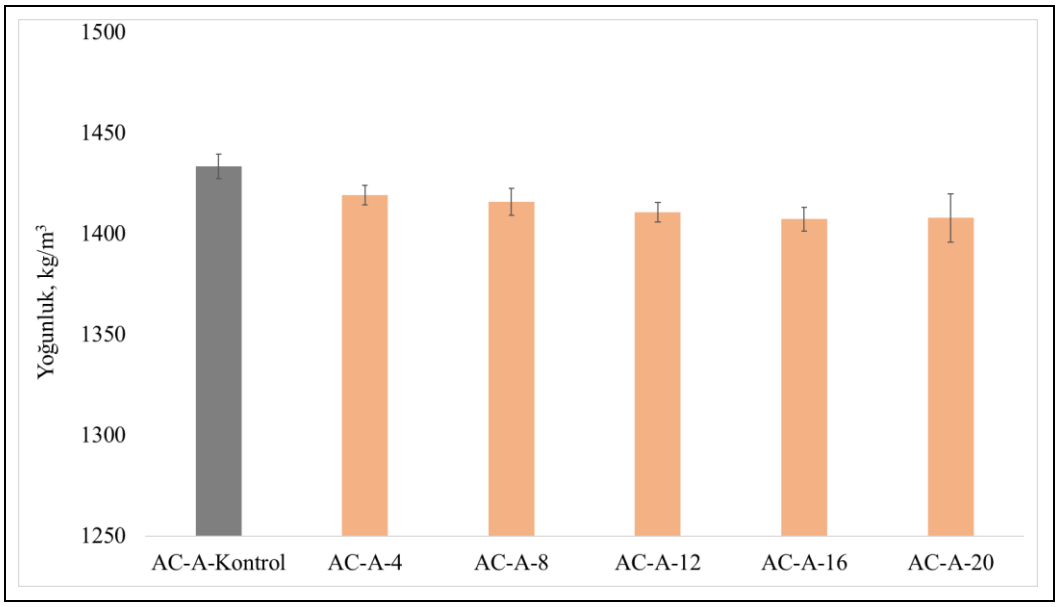
gösterirken, %16 ve %20'lik numunelerin eğilme dayanımları ise sırasıyla %2,0 ve %5,2 düşmüştür. Sonuçlar göz önüne alındığında en yüksek değeri veren AC-A-8 numunesinin daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğu [35-39, 49, 54, 100, 109-110] ve ara yüzeydeki bağ yapısının numuneler içinde en iyisi olduğu [34, 45, 48-49, 109-110] söylenebilir.

Çizelge 4.8. İkinci aşama reçetelerine ait ortalama su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

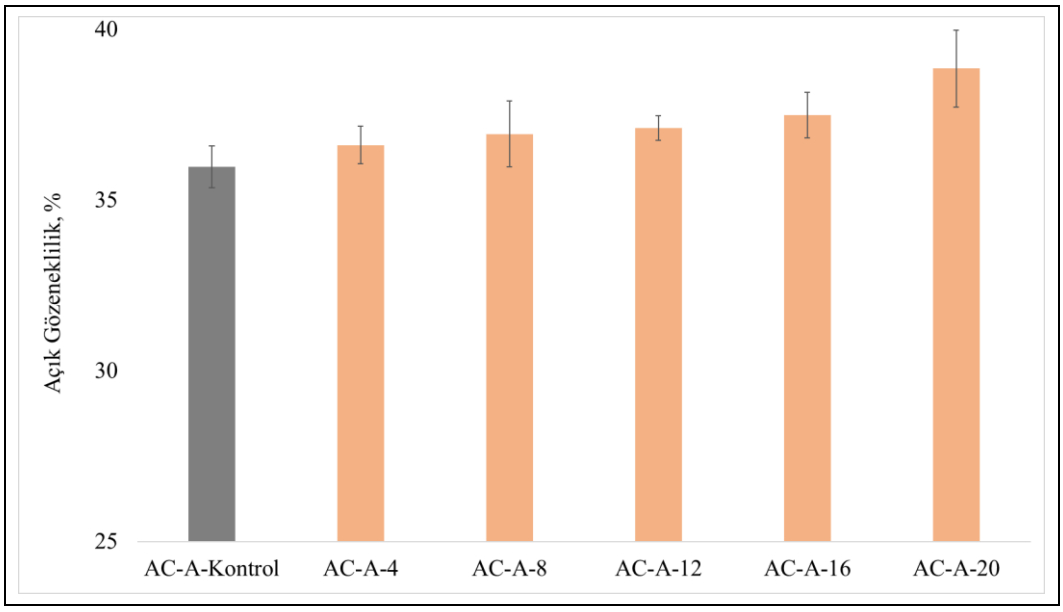
Numune	Su Emme Oranı, %	Kontrole Göre Değişim, %	Yoğunluk, kg/m^3	Kontrole Göre Değişim, %	Açık Gözeneklilik, %	Kontrole Göre Değişim, %
Kontrol	25,10	-	1433	-	35,97	-
AC-A-4	26,16	4,1	1419	-1,0	36,61	1,7
AC-A-8	26,37	4,8	1416	-1,2	36,94	2,6
AC-A-12	26,70	6,0	1411	-1,6	37,12	3,1
AC-A-16	26,86	6,6	1407	-1,8	37,50	4,1
AC-A-20	27,61	9,1	1399	-2,4	38,86	7,4



Şekil 4.10. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama su emme oranı değerleri



Şekil 4.11. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama yoğunluk değerleri

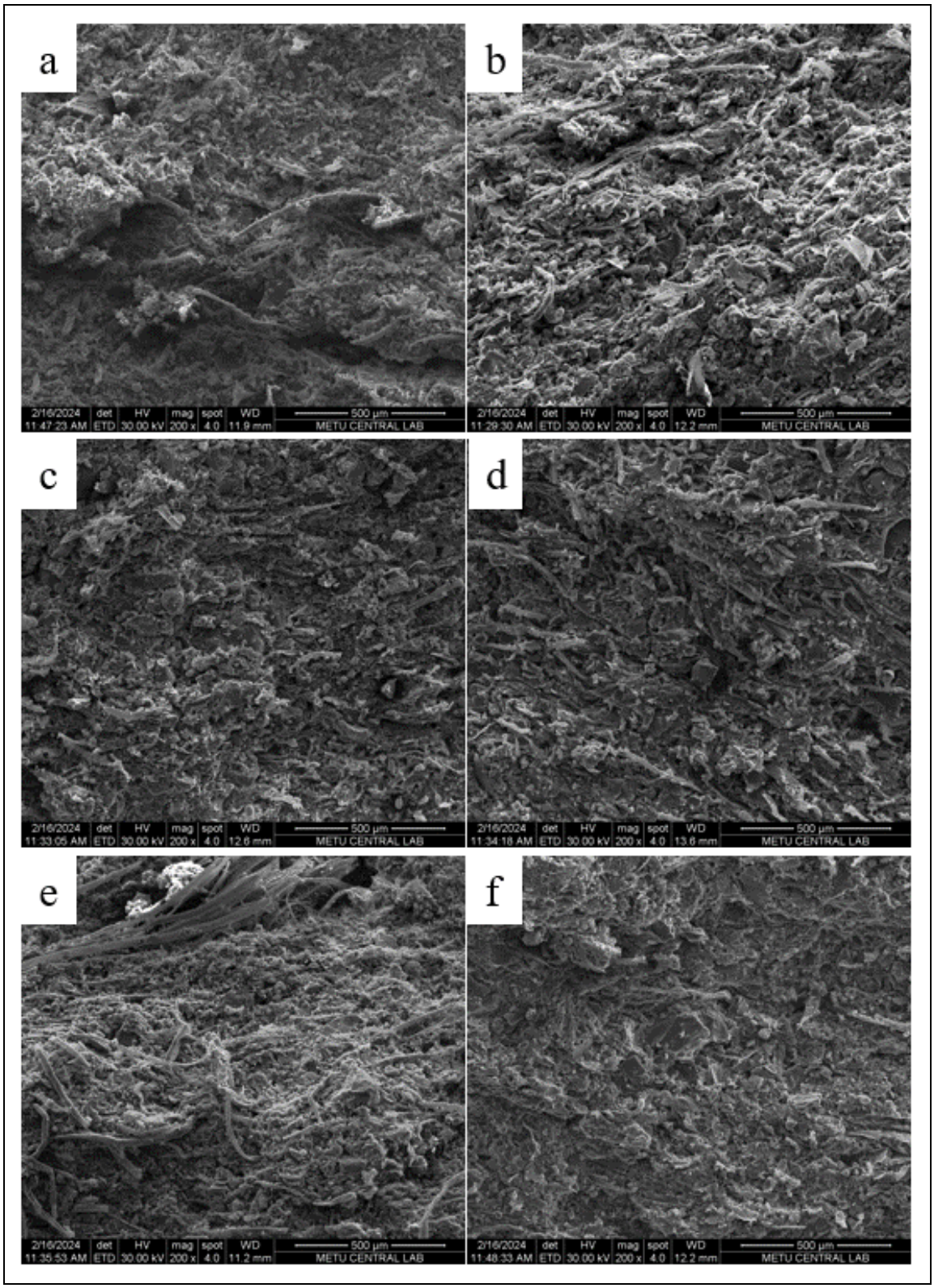


Şekil 4.12. İkinci aşama atık cam reçetelerine ait ortalama açık gözeneklilik değerleri

Fiziksel özelliklere bakıldığında su emme oranı ve açık gözeneklilik oranı atık cam ikame oranı arttıkça yükselirken, yoğunluk ise düşüş göstermiştir. Genel kapsamda bu üç bulgunun birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. İlk aşamadaki çalışmaların aksine ikame oranlarının daha düşük seviyelerde olması ve karışım homojenliğinin daha yüksek oranlarda olması sebebiyle bu sonuçların elde edildiği yorumu yapılabilir. Bu durum, atık cam ikamesi arttıkça yapının daha gözenekli hale geldiği anlamına gelmektedir [36, 38, 43, 48-49].

4.4. Çimento Kompozit Levhaların SEM Karakterizasyonu

Farklı partikül boyut dağılımına sahip atık camlar kullanılarak üretilen numunelerin SEM karakterizasyon sonuçları Resim 4.2'de sunulmuştur. Tipik olarak, çimento hamuru ile agrega arasındaki bağ betonun mekanik davranışını etkileyen önemli bir bileşen olarak kabul edilir. Agrega ile temas halindeki çimento hamurunun doğası, genellikle arayüzey geçiş bölgesi olarak karakterize edilir ve dolayısıyla bağ performansının, agreganın yüzey pürüzlülüğü, mikro dolguların varlığı veya yokluğu, agrega parçacıkları ile çimento hamuru arasındaki kimyasal etkileşimler gibi çeşitli faktörlerden etkilendiği gösterilmiştir. Resim 4.2, çimento matrisi ile agreganın yerini alan atık cam arasındaki zayıf teması göstermektedir. Her ne kadar çimento matrisinin bazı parçaları agrega parçacıklarıyla temas halinde görünse de, çimento matrisinin geri dönüştürülmüş cam agregaya yapışması ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş cam atıklarının pürüzsüz yüzey dokusundan dolayı beton matrisinde zayıf bir homojenliğin olduğu fark edilmektedir. A, B ve C sınıfı atık cam kullanıldığındaki durumlarda, C-S-H iğnelerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca, hidrasyon ürünleri de yoğunlaşmıştır, bu da puzolanik reaksiyonun devam ettiğini göstermektedir [34, 45, 54].



Resim 4.2. Numunelerin SEM görüntüleri, (a) Kontrol, (b) AC-A-10, (c) AC-B-10, (d) AC-C-10, (e) AC-D-10, (f) AC-A-8

4.5. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Çevresel kirliliğin ve emisyonların global etkisini azaltmak için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi, bir ürünün ham madde çıkarılması aşamasında bertarafına kadar olan kısımların çevresel etkilerini detaylı şekilde belirlemek için yapılmaktadır. Bu değerlendirmenin sonuçları, yeni ham maddelerin sisteme entegre edilmesi konusundaki karar mekanizmalarında önemli rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında yaşam döngüsü değerlendirmesi için beş farklı senaryo gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar aşağıda verilmiştir.

- Senaryo K: Tepe Betopan'a ait orijinal reçete ile çimento kompozit levha üretimi
- Senaryo A20: A sınıfı (0-38 μm) ve %20 atık cam ikame oranı ile çimento kompozit levha üretimi
- Senaryo B20: B sınıfı (38-63 μm) ve %20 atık cam ikame oranı ile çimento kompozit levha üretimi
- Senaryo C20: C sınıfı (63-90 μm) ve %20 atık cam ikame oranı ile çimento kompozit levha üretimi
- Senaryo D20: D sınıfı (90-212 μm) ve %20 atık cam ikame oranı ile çimento kompozit levha üretimi

Bu senaryolar orijinal reçeteye kıyasla farklı partikül boyutu aralığındaki atık camların agregaya %20 oranında ikame edildiği durumları karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Senaryoları oluştururken daha sağlıklı sonuçlar elde etmek için birkaç varsayımda bulunulmuştur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Her çimento kompozit levhanın üretim sürecinde kullanılan ham maddeler birebir aynıdır.
- Atık camların partikül boyut dağılımı değiştiğinde tek değişen parametrenin bilyalı değirmenden kaynaklanan elektrik enerjisi tüketimi olduğu şeklinde varsayılmıştır. Değişen elektrik enerjisi atık camları öğütme aşamasında belirlenen bilyalı değirmen kalibrasyon tablosundan yola çıkılarak tespit edilmiştir.

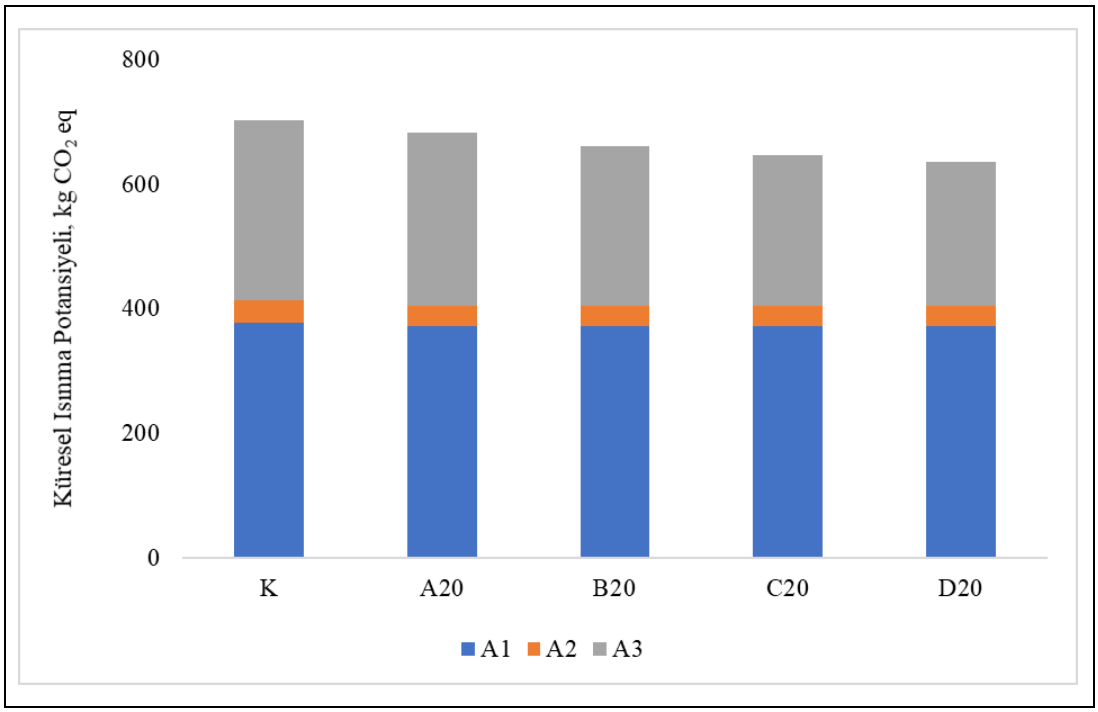
- Levhalara ait ham maddelerin tüketimi, ham maddelerin tesise nakliyesi, üretim esnasında tüketilen elektrik, su, doğal gaz, ambalaj ve forklift yakıtı gibi parametreler YDD'ye dahil edilmiştir.
- İhmal edilen parametreler ise insan emeği, ofis eşyalarının genel tüketimi, söndürme-soğutma sistemleri, binek araçların kullandığı yakıtlar şeklindedir.

YDD kapsamında kaliteli verilerin daha belirgin olduğu beşikten kapıya modeli uygulanmıştır. Bu modelde ham madde temini (A1), ham maddelerin tesise taşınması (A2) ve üretim (A3) aşamaları mevcuttur. Modeli uygulamak için gerekli olan veriler Tepe Betopan A.Ş.'ye ait üretim tesisinin 2022 yılındaki faaliyetlerinden yola çıkılarak elde edilmiştir. YDD'ye kütlecce %1'den daha yüksek paya sahip olan tüm girdiler ve çıktılar dahil edilmiştir. Kütlece %1'den daha düşük oranda olan sızdırmazlık bandı, polyester çember, çelik çember, hava yastığı ve destek aparatı gibi ambalaj malzemeleri model dahil edilmemiştir. Son olarak herhangi bir kriter olmaksızın tüm enerji girdi ve çıktıları modele entegre edilmiştir [111-112].

YDD çalışması sonucu elde edilen en kritik iki değerlendirme parametreleri olan küresel ısınma potansiyeli ve kümülatif enerji talebi bulguları sırasıyla Çizelge 4.9'da, Şekil 4.13'te ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Senaryolara ait ham veriler ise EK-16, EK-17, EK-18, EK-19 ve EK-20'de verilmiştir.

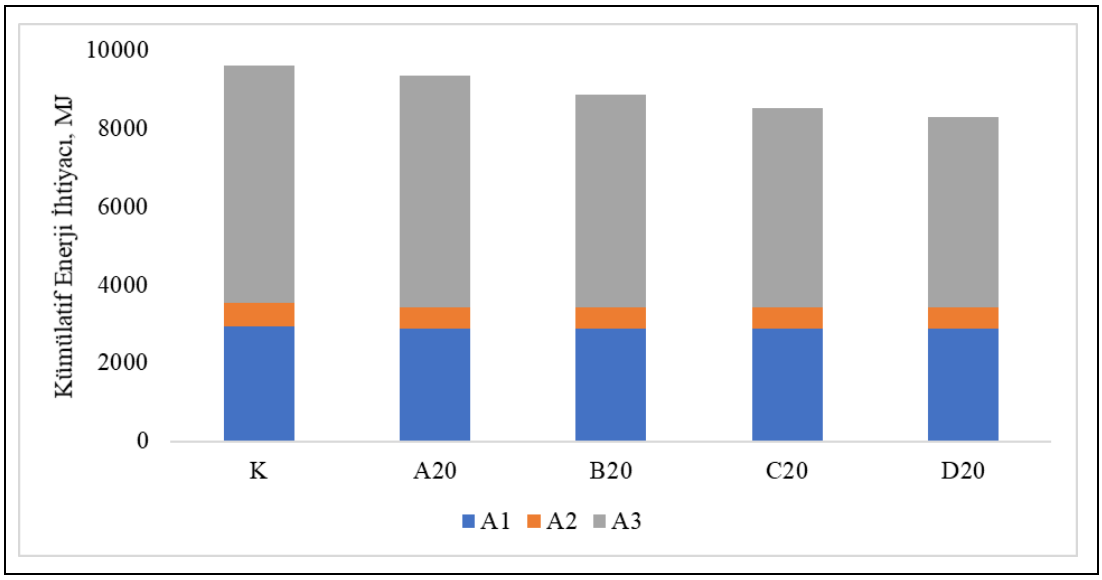
Çizelge 4.9. Oluşturulan senaryolar için yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları

Senaryo	Küresel Isınma Potansiyeli, kg $CO_{2\text{-eq}}$			Kümülatif Enerji İhtiyacı, MJ		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
K	377	37	288	2926	609	6078
A20	372	33	278	2885	547	5924
B20	372	33	256	2885	547	5430
C20	372	33	241	2885	547	5088
D20	372	33	231	2885	547	4859



Şekil 4.13. Çimento kompozit levhaların beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesi küresel ısınma potansiyeli değerleri

Senaryo sonuçları incelendiğinde küresel ısınma potansiyeline en çok etkisi olan adım yaklaşık %55'lik oranla ham madde temini aşamasıdır. Bu durumun temel nedeni olarak çimentonun çevresel yükünün oldukça fazla olması gösterilebilir [113]. Diğer aşamalar olan A2 ve A3'ün etkileri ise sırasıyla %5 ve %40 olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucu incelediğinde en yüksek etkiye sahip olan aşamanın ham madde temini ve kullanımı olması sebebiyle ikincil ham maddelerin kullanımının gerekliliği bir kez daha anlaşılmıştır. En yüksek etkiye sahip olan senaryo, Senaryo K iken Senaryo A20; Senaryo B20; Senaryo C20 ve Senaryo D20, Senaryo K'ye göre sırasıyla %2,7; %6,2; %8,7 ve %10,4 düşüş göstermiştir. Bu durum, atık sahalarında bertaraf edilmeyi bekleyen atık camın değerlendirilerek üretimde ham madde olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Agreganın sadece %20'sinin atık cam ile ikame edilmesi bile çevresel etkilerde %8 oranına varan düşüş sağlamıştır. Küresel ısınma potansiyelini düşüren bir diğer parametre ise atık camların daha kaba boyutlarda daha az bilyalı değirmen kullanmayı gerektirmesidir. Bu nedenle atık cam partikül boyutu yükseldikçe harcanan enerji miktarı azaldığından çevresel etki de azalmış olur.



Şekil 4.14. Çimento kompozit levhaların beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesi kümülatif enerji ihtiyacı değerleri

Kümülatif enerji ihtiyacı değerlerine bakıldığında bulgular 9610 MJ ile 8290 MJ arasında değiştiği görülmektedir. Senaryoların büyükten küçüğe doğru sıralaması da küresel ısınma potansiyeli bulguları ile paralellik göstermiştir. En yüksek etkiye sahip olan senaryo, Senaryo K iken Senaryo A20; Senaryo B20; Senaryo C20 ve Senaryo D20, Senaryo K'ye göre sırasıyla %2,7; %8,5; %12,8 ve %15,9 düşüş göstermiştir. En yüksek etkiye sahip olan aşama %60'lık pay ile A3 aşaması olarak bulunmuştur. Yani en çok enerji talebi üretim aşamasında gerçekleşmektedir. Bu durum, üretim prosesinde bilyalı değirmen, ön kürleme fırını ve otoklav gibi yüksek miktarlarda enerji ile faaliyet gösteren ekipmanların tüketimini göstermektedir. Atık cam partikül boyutu büyüdükçe A3 değerinin küçülmesinin sebebi, bilyalı değirmenden kaynaklanan enerji tüketiminin azalması olarak yorumlanabilir. A1 aşaması ise yaklaşık %34'lük pay ile ikinci en etkili aşama olarak tespit edilmiştir. Agregaya %20 oranında ikame edilen atık cam kullanımı ile bu aşamanın etkisi yaklaşık %1,5'lik düşüş göstermiştir. En son sırada ise yaklaşık %6'lık pay ile lojistik aşaması yer almaktadır. Burada Senaryo K ile atık cam kullanıldığındaki diğer senaryolar karşılaştırıldığında %10'luk düşüş görülmektedir. Bu durum reçete içerisindeki en fazla yüzdelik dilime sahip olan agreganın %20'lik kısmının daha yakın mesafelerden temin edilen atık cam ile ikame edilmesinden kaynaklanmaktadır.

2022 yılı üretim miktarı 25 000 m^3 olarak ele alındığında, orijinal reçete olan Senaryo K yerine en ince atık cam agregasının kullanıldığı Senaryo A20 seçilirse küresel ısınma

potansiyeli ve kümülatif enerji ihtiyacı değerlerinde sırasıyla 475 000 kg $CO_{2\ eq}$ ve 6 250 000 MJ azalma meydana geleceği YDD çalışması sonucu açığa çıkmıştır. Bu değer 375 000 ton kömürün yakılmasına, 95 hanenin yıllık elektrik tüketimine, benzinli bir aracın 3 125 000 km yol alabilmek için ihtiyaç duyduğu benzinin tüketimine ve 260 ton atığın geri dönüştürülmesine denktir [114].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ana hedefi atık malzemelerin kullanımı ile yeni nesil çimento kompozit levha üretilmesidir. Bu doğrultuda atık kağıt hamuru ve atık cam ile reçeteler oluşturulmuş ve bulgular TS EN 12467 standardına göre değerlendirilmiştir. İlk olarak atık kağıt hamuru ham selüloz yerine kullanılmış, sonrasında ise dört farklı partikül boyut aralığındaki atık camın agregaya ikamesi ile devam edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Maksimum 38 mikron boyutundaki atık camın çimento kompozit levha üretiminde agregaya ikame olarak kullanılması %20 oranına kadar mümkündür. En iyi sonuç kontrol numunesine göre %5'lik artış gösteren %8 atık cam ikamesinden elde edilmiştir.
- Atık camın partikül boyutu ve agregaya ikame oranı arttıkça çimento kompozit levhaların eğilme dayanımı önemli ölçüde düşmüştür. Bu, atık camın nispeten yüksek pürüzsüzlüğü nedeniyle çimento hamuru ile geri dönüştürülmüş cam arasındaki bağ mukavemetinin azalmasına, bunun da çatlaklara ve dolayısıyla atık cam ile çimento hamuru arasında zayıf yapışmaya yol açmasına atfedilir. SEM görüntüleri de bu durumu desteklemiştir.
- Su emme oranı ve açık gözeneklilik değerlerinde A sınıfı atık camın %20 kullanıldığı durumda kontrol numunesine göre en çok artış gösteren numune olduğu bulunmuştur.
- Genel kapsamda ise yoğunluk değerlerinde maksimum %2'lik fark elde edilmiştir.
- Atık camın boyutu ve ikame oranının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik özellikleri üzerindeki etkisinden çok daha fazladır.
- Elde edilen sonuçlar, puzolanik aktivitenin tane boyutunun küçülmesiyle daha belirgin hale gelmesi nedeniyle daha büyük temas yüzeylerinin daha iyi reaksiyon hızları sağladığını ortaya çıkarmıştır. 38 mikron altındaki atık camın en yüksek puzolanik aktiviteyi gösterdiği görülmüştür.
- Genel olarak ince öğütülmüş atık cam agregasının çimento kompozit levha üretiminde kullanılması ümit vericidir. Yine de ürün performansını garantilemek için safsızlıkları ve cam homojenliğini sağlamak için önlemler alınması gerekebilir.
- Atık cam kullanımı çimento kompozite levha üzerinde herhangi bir renk değişimi yaratmamıştır.

- Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçlarına göre atık cam kullanımının beklendiği üzere çimento kompozit levha üretim prosesinin çevresel etkisini azalttığı görülmüştür. Endüstriyel veriler olmadan sadece yaklaşımlarla yapılan sonuçlar bile gelecek için ümit vadetmektedir. Sonraki aşamalarda ham madde temini aşamasından ürünün yaşam sonu bertaraf işlemlerine kadar olan kısmı kapsayan beşikten mezara modelinin uygulanması ve kesin çevresel etkilerin hesaplanarak yorumlanması uygun olabilir.

KAYNAKLAR

1. Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., and Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction–A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105745.

2. Li, X., Qin, D., Hu, Y., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., and Joyklad, P. (2022). A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, 45, 103447

3. Junaid, M. F., ur Rehman, Z., Kuruc, M., Medveď, I., Bačinskas, D., Čurpek, J., and Ansari, W. S. (2022). Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. *Construction and Building Materials*, 319, 126061.

4. Jahami, A., and Issa, C. A. (2023). Exploring the use of mixed waste materials (MWM) in concrete for sustainable construction: a review. *Construction and Building Materials*, 398, 132476.

5. Thakur, A. K., Pappu, A., and Thakur, V. K. (2018). Resource efficiency impact on marble waste recycling towards sustainable green construction materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 91-101.

6. Al Salaheen, M., Alaloul, W. S., Alzubi, K. M., and Musarat, M. A. (2023). Advancing waste-based construction materials through carbon dioxide curing: A comprehensive review. *Results in Engineering*, 101591.

7. Tansel, B. (2020). Increasing gaps between materials demand and materials recycling rates: A historical perspective for evolution of consumer products and waste quantities. *Journal of Environmental Management*, 276, 111196.

8. Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D. and Heinz, M. (2015), How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 765-777.

9. Merrild, H., Larsen, A. W., and Christensen, T. H. (2012). Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: the importance of efficient energy recovery and transport distances. *Waste management*, 32(5), 1009-1018.

10. Sanyal, A. P., Mohanty, S., and Sarkar, A. (2023). Application of recycled aggregates generated from waste materials towards improvement in acoustical and thermal conductivity of concrete. *Materials Today*: *Proceedings*.

11. Chinnu, S. N., Minnu, S. N., Bahurudeen, A., and Senthilkumar, R. (2021). Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: A step towards cleaner production of concrete. *Construction and Building Materials*, 287, 123056.

12. Coniglio, N., Spitz, N., and El Mansori, M. (2020). Designing metallic surfaces in contact with hardening fresh concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 255, 119384.

13. Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete international*, 24(7), 23-28.

14. Kurniati, E. O., Pederson, F., and Kim, H. J. (2023). Application of steel slags, ferronickel slags, and copper mining waste as construction materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107175.

15. Nalon, G. H., Santos, R. F., de Lima, G. E. S., Andrade, I. K. R., Pedroti, L. G., Ribeiro, J. C. L., and de Carvalho, J. M. F. (2022). Recycling waste materials to produce self-sensing concretes for smart and sustainable structures: A review. *Construction and Building Materials*, 325, 126658.

16. Mei, J., Xu, G., Ahmad, W., Khan, K., Amin, M. N., Aslam, F., and Alaskar, A. (2022). Promoting sustainable materials using recycled rubber in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133927.

17. Guo, F., Wang, J., and Song, Y. (2022). How to promote sustainable development of construction and demolition waste recycling systems: production subsidies or consumption subsidies?. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 407-423.

18. Ming, Y., Chen, P., Li, L., Gan, G., and Pan, G. (2021). A comprehensive review on the utilization of recycled waste fibers in cement-based composites. *Materials*, 14(13), 3643.

19. Rezende, E. C. L., Costa e Silva, A. J., Delgado, J. M. P. Q., and Azevedo, A. C. (2021). Technological performance of recycled waste paper cellulosic fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6, 1-6.

20. Bencardino, F., Mazzuca, P., do Carmo, R., Costa, H., and Curto, R. (2024). Cement-Based Mortars with Waste Paper Sludge-Derived Cellulose Fibers for Building Applications. *Fibers*, 12(2), 13.

21. Hospodarova, V., Stevulova, N., Briancin, J., and Kostelanska, K. (2018). Investigation of waste paper cellulosic fibers utilization into cement based building materials. *Buildings*, 8(3), 43.

22. Axinte, E. (2011). Glasses as engineering materials: A review. *Materials & Design*, 32(4), 1717-1732.

23. Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2017). Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. *Materials & Design*, 135, 102-111.

24. Ahmad1E, J., Aslam, F., Martinez-Garcia, R., de-Prado-Gil, J., Qaidi, S. M., and Brahmia, A. (2021). Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete. *Scientific Reports*, 11, 21525..

25. Ahmed, H. U., Mohammed, A. S., Qaidi, S. M., Faraj, R. H., Hamah Sor, N., and Mohammed, A. A. (2023). Compressive strength of geopolymer concrete composites: a systematic comprehensive review, analysis and modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(3), 1383-1428.

26. Harrison, E., Berenjian, A., and Seifan, M. (2020). Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. *Environmental Science and Ecotechnology*, 4, 100064**.**

27. Federico, L. M., and Chidiac, S. E. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete–critical review of treatment methods. *Cement and concrete composites*, 31(8), 606-610.

28. Jani, Y., and Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1767–1775.

29. İnternet: International Year of Glass 2022: The global glass economy and its wider social consequences. *IYOG2022*. URL*:* https://www.iyog2022.org/images/files/77-economicsiyog-200925.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.

30. İnternet: Close the Glass Loop. Europe's glass value chain confirms steady progress at 79% glass collection for recycling. *Close the Glass Loop EU*. URL: https://closetheglassloop.eu/europes-glass-value-chain-reaches-major-milestone/, Son Erişim Tarihi: 06.04.2024.

31. İnternet: Maximize Market Research. Glass Recycling Market – Global Market Forecast and Growth Opportunities Forecast 2023-2029. *Maximize Market Research.* URL*:* https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/glass-recycling-market/22548/, Son Erişim Tarihi: 18.04.2024.

32. Qaidi, S., Najm, H. M., Abed, S. M., Özkılıç, Y. O., Al Dughaishi, H., Alosta, M., and Milad, A. (2022). Concrete containing waste glass as an environmentally friendly aggregate: A review on fresh and mechanical characteristics. *Materials*, 15(18), 6222.

33. Rashad, A. M. (2014). Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Construction and Building Materials*, 72, 340-357.

34. Ali, E. E., and Al-Tersawy, S. H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791.

35. Limbachiya, M. C. (2009). Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1078-1083.

36. Park, S. B., Lee, B. C., and Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181-2189.

37. Sikora, P., Augustyniak, A., Cendrowski, K., Horszczaruk, E., Rucinska, T., Nawrotek, P., and Mijowska, E. (2016). Characterization of mechanical and bactericidal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanomaterials. *Materials*, 9(8), 701

38. Tan, K. H., and Du, H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part I–Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 109-117.

39. Tuaum, A., Shitote, S., and Oyawa, W. (2018). Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. *Buildings*, 8(2), 15.

40. Batayneh, M., Marie, I., and Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870-1876.

41. Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G., and Montenero, A. J. W. M. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, 25(2), 197-201.

42. Ismail, Z. Z., and Al-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29(2), 655-659.

43. Penacho, P., de Brito, J., and Veiga, M. R. (2014). Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 50, 47-59.

44. Tamanna, N., Tuladhar, R., and Sivakugan, N. (2020). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117804.

45. Afshinnia, K., and Rangaraju, P. R. (2016). Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 117, 263-272.

46. Lam, C. S., Poon, C. S., and Chan, D. (2007). Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass–ASR consideration. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 616-625.

47. Topcu, I. B., and Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267-274.

48. Kou, S. C., and Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 107-113.

49. Lee, G., Poon, C. S., Wong, Y. L., and Ling, T. C. (2013). Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry–mixed concrete blocks. Construction and building materials, 38, 638-643.

50. Du, H., and Tan, K. H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II–Alkali–silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 118-126.

51. Liu, Z., Shi, C., Shi, Q., Tan, X., and Meng, W. (2022). Recycling waste glass aggregate in concrete: Mitigation of alkali-silica reaction (ASR) by carbonation curing. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133545.

52. Serpa, D., Silva, A. S., de Brito, J., Pontes, J., and Soares, D. (2013). ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials*, 47, 489-495.

53. Bouchikhi, A., Benzerzour, M., Abriak, N. E., Maherzi, W., and Mamindy-Pajany, Y. (2019). Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 197, 626-640.

54. Khmiri, A., Chaabouni, M., and Samet, B. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, 44, 74-80.

55. Jiang, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., and Shi, C. (2019). A critical review of waste glass powder–Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *Journal of Environmental Management*, 242, 440-449.

56. Colangelo, F., Cioffi, R., and Farina, I. (2021). *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management: Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-friendly Binders, and Life Cycle Assessment*. United Kingdom: Woodhead Publishing, 109-145.

57. İnternet: Ürünler. tepePAN. *Tepe Betopan.* URL*:* www.betopan.com.tr/tr/urunler/tepepan, Son Erişim Tarihi: 19.05.2024.

58. Ranachowski, Z., and Schabowicz, K. (2018). *The Fabrication, Testing and Application of Fibre Cement Boards*. United Kingdoms: Cambridge Scholars Publishing, 7-30.

59. Kottititum, B., Phung, Q. T., Maes, N., Prakaypan, W., and Srinophakun, T. (2018). Early Age carbonation of fiber-cement composites under real processing conditions: A parametric investigation. *Applied Sciences*, 8(2), 190.

60. Mobasher, B. (2011). *Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites* (1st Ed.). United States: CRC press.

61. İnternet: Industrial Reports. Fiber Cement Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts Up To 2030. *Mordor Intelligence*. URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-cement-market, Son Erişim Tarihi: 13.04.2024.

62. Gonçalves, M. C., and Margarido, F. (2015). *Materials for Construction and Civil Engineering* (1st Ed.). Cham, Switzerland: Springer.

63. Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194-216.

64. Hannant, D.J., Siva, S.B.V., Sreekanth, P.S.R. (2018). *Comprehensive Composite Materials II*. United States: Elsevier, 379-420.

65. TS EN 197-1. (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Entitüsü,* Ankara.

66. Claisse, P. A. (2015). *Civil Engineering Materials* (1st Ed.). United Kingdom: Butterworth-Heinemann.

67. Taylor, H. F. (1997). *Cement Chemistry* (2nd Ed.). United Kingdom: Thomas Telford.

68. Menéndez, E., Sanjuán, M. Á., García-Roves, R., Argiz, C., and Recino, H. (2020). Sustainable and durable performance of pozzolanic additions to prevent alkali-silica reaction (ASR) promoted by aggregates with different reaction rates. *Applied Sciences*, 10(24), 9042.

69. Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali–silica reaction. *Construction and Building Materials*, 100, 234-245.

70. Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., and Almakrab, A. (2021). Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00563.

71. İnternet: Beton. Betonda Alkali Silika Reaksiyonu. *Beton ve Çimento*. URL: https://www.betonvecimento.com/beton-2/alkali-silika-reaksiyonu, Son Erişim Tarihi: 29.04.2024.

72. Revuelta, M. B. (2021). *Construction Materials: Geology, Production and Applications* (1st Ed.). United States: Springer Nature.

73. Georgescu, M., Mohanu, I., Voicu, G., & Cotofana, V. (2012). Physical-chemical processes at hardening of some lime-limestone-volcanic tuff composites. *UPB Buletin Stiintific, Series B: Chemistry and Materials Science*, 74(1), 131-142.

74. Walker, R., and Pavía, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. *Materials and Structures*, 44, 1139-1150.

75. McCarthy, M. J., and Dyer, T. D. (2019). Pozzolanas and pozzolanic materials. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5, 363-467.

76. Golewski, G. L. (2022). The role of pozzolanic activity of siliceous fly ash in the formation of the structure of sustainable cementitious composites. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 520-534.

77. Ardanuy, M., Claramunt, J., and Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115-128.

78. Balea, A., Fuente, E., Monte, M. C., Blanco, Á., and Negro, C. (2021). *Fiber Reinforced Composites*. United: Kingdom: Woodhead Publishing, 597-648.

79. Ferreira, S. R., Pepe, M., Martinelli, E., de Andrade Silva, F., and Toledo Filho, R. D. (2018). Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. *Composites Part B: Engineering*, 140, 183-196.

80. Bell, L. W., Huffman, M. S., Powers, A. C., Ernzen, J., Khan, T. S., Rivera-Villarreal, R., and Chairman, S. (1999). *Aggregates For Concrete*. United States: ACI Committee, 1-26.

81. Neves, J., Diogo, A. C., Freire, A. C., and de Brito, J. (2015). Aggregates. *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*. Cham, Switzerland: Springer, 857-896.

82. Arulmoly, B., and Konthesingha, C. (2022). Pertinence of alternative fine aggregates for concrete and mortar: A brief review on river sand substitutions. *Australian Journal of Civil Engineering*, 20(2), 272-307.

83. Thomas, M. D. A., & Folliard, K. J. (2007). Concrete aggregates and the durability of concrete. *Durability of Concrete and Cement Composites*, 10, 247-281.

84. Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., and Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196.

85. Mohammed, M., Shafiq, N., Abdallah, N. A. W., Ayoub, M., & Haruna, A. (2020). A review on achieving sustainable construction waste management through application of 3R (reduction, reuse, recycling): A lifecycle approach. *IOP Publishing*, 476 (1), 012010.

86. Khan, H., Baig, A., Faisal, M., Khan, A., Gul, K., Ali, N., and Bilal, M. (2022). Exploration of solid waste materials for sustainable manufacturing of cementitious composites. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86606-86615.

87. Lepech, M. D., Li, V. C., Robertson, R. E., and Keoleian, G. A. (2008). Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Materials Journal*, 105(6), 567-575.

88. Saikia, N., & de Brito, J. (2009). Use of industrial waste and municipality solid waste as aggregate, filler or fiber in cement mortar and concrete. *Advances in Materials Science Research*, 3, 65-116.

89. ISO 14040:2006a. (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. *International Organization for Standardization*, Geneva.

90. ISO 14044:2006b. (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. *International Organization for Standardization*, Geneva.

91. Song, X., Carlsson, C., Kiilsgaard, R., Bendz, D., & Kennedy, H. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Sustainability*, 12(20), 8442.

92. Shaked, S., Crettaz, P., Saade-Sbeih, M., Jolliet, O., and Jolliet, A. (2015). Environmental Life Cycle Assessment (1st Ed.). United States: CRC press..

93. Fatemi, F. (2013). *A Novel Methodology for the Assessment of the Direct and Indirect Impacts Associated with the Depletion of Fossil Resources in Life Cycle Assessment*. Ph. D. Thesis. École Polytechnique de Montréal Département de génie chimique, Montreal, 29-51.

94. Suh, S., Lenzen, M., Treloar, G.J., Hondo, H., Horvath, A., Huppes, G., Jolliet, O., et al. (2004). System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches, *Environmental Science and Technology*, 38(3), 657–664.

95. Song, X., Carlsson, C., Kiilsgaard, R., Bendz, D., and Kennedy, H. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Sustainability*, 12(20), 8442.

96. King, B. (2017). The new carbon architecture: Building to cool the climate. Inside: Chapter two: Counting carbon: What we know and how we know it. *Canada: New Society Publishers*, 2, 17-31.

97. EN 15978:2011. (2011). Sustainability of Construction Works-Assessment of Environmental Performance of Buildings-Calculation Method. European Committee for Standardization, Brussels.

98. Sherratt, A. (2013). *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility* (1st Ed.). Cham, Switzerland: Springer, 630-638.

99. Wang, H. Y. (2009). A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. *Waste Management*, 29(1), 335-341.

100. Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877.

101. İnternet: CEM II/A-S 42,5 R Teknik Veri Sayfası. Çimsa. URL: https://cimsa.com.tr/wp-content/uploads/2022/03/ESKISEHIR-CEM-I-425-R-TDS-TR-22.03.22.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.05.2024.

102. ASTM C 618. (2010). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM International*, USA.

103. Çelik, M. H., Aruntaş, H. Y., ve Baran, Y. (2003). Seyitömer Ve Çayırhan Uçucu Küllerinin Portland Çimentosu-Uçucu Kül (Pç-Uk) Hamurunun Priz Başlama Ve Sonu Sürelerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 6(1), 397-409.

104. ASTM E 11. (2022). Standard Specification for Woven Wire Test Sieves. *ASTM International*, USA.

105. TS 1225 ISO 565. (2001). Deney elekleri - Metal tel örgülü elekler, delikli metal plâkalar, elektrokimyasal şekillendirilmiş levhalar - Göz ve delik açıklıklarının anma büyüklükleri. *Türk Standartları Entitüsü*, Ankara.

106. Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., and Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467.

107. TS EN ISO 5267-1. (2001). Kağıt hamurları- Süzülebilirlik tayini- Bölüm 1: Schopper-Riegler metodu. *Türk Standartları Entitüsü*, Ankara.

108. TS 8307 EN ISO 41119. (1997). Kağıt hamurları - Stok konsantrasyonu tayini. *Türk Standartları Entitüsü*, Ankara.

109. Borges, A. L., Soares, S. M., Freitas, T. O. G., Oliveira Júnior, A. D., Ferreira, E. B., and Ferreira, F. G. D. S. (2021). Evaluation of the pozzolanic activity of glass powder in three maximum grain sizes. *Materials Research*, 24, e20200496.

110. Letelier, V., Henríquez-Jara, B. I., Manosalva, M., Parodi, C., & Ortega, J. M. (2019). Use of waste glass as a replacement for raw materials in mortars with a lower environmental impact. *Energies*, 12(10), 1974.

111. BS EN 15804:2012+A2:2019. (2012). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. *British Standards Institution*, England.

112. Gomes, V., and Pulgrossi, L. M. (2020). *When part is too little: cutoff rules' influence on LCA application to whole-building studies*. 11th Windsor Conference Resilent Comfort, London, England.

113. Debnath, K., Gorrepotu, S. R., and Posinasetti, N. R. (2022). *Life Cycle Assessment (LCA) of Flax-Based Green Composite Product Fabricated by Injection Moulding Process*. 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR), Krakow, Poland.

114. İnternet: EPA. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. *US EPA*. URL: https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator, Son Erişim Tarihi: 15.05.2024.

EKLER

EK-1. Atık cam öğütme işlemine ait bilyalı değirmen kalibrasyon değerleri

Devir Sayısı	Partikül Boyut Dağılımı, µm
1200	%94 < 212
1800	%99 < 90
2700	%97 < 63
4000	%99 < 38

EK-2. İlk aşamada atık kağıt hamuru ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
Kontrol	6,03	6,01
Kontrol	5,56	
Kontrol	6,45	
AH-10	5,00	4,92
AH-10	5,60	
AH-10	4,15	
AH-20	3,33	4,27
AH-20	4,95	
AH-20	4,53	
AH-30	4,14	4,19
AH-30	4,28	
AH-30	4,15	
AH-40	3,91	3,88
AH-40	4,10	
AH-40	3,62	
AH-50	2,93	3,47
AH-50	4,43	
AH-50	3,06	

EK-3. İlk aşamada atık kağıt hamuru ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
Kontrol	26,09	25,93	1456,0	1442,52	37,98	37,41
Kontrol	25,70		1431,2		38,21	
Kontrol	26,02		1440,4		36,04	
AH-10	25,09	24,42	1464,1	1470,30	36,74	25,89
AH-10	24,79		1456,2		36,10	
AH-10	23,37		1490,5		34,83	
AH-20	23,68	23,98	1446,9	1472,91	34,25	35,32
AH-20	23,68		1495,3		35,41	
AH-20	24,59		1476,6		36,31	
AH-30	25,26	24,21	1434,3	1452,85	36,24	35,13
AH-30	24,16		1429,6		35,97	
AH-30	23,21		1494,6		33,19	
AH-40	23,41	23,99	1434,6	1452,39	33,58	34,85
AH-40	23,74		1464,2		34,75	
AH-40	24,83		1458,4		36,21	
AH-50	22,24	23,12	1497,0	1477,89	33,30	34,15
AH-50	23,29		1483,9		33,08	
AH-50	23,83		1452,7		36,08	

EK-4. İlk aşamada üretilen kontrol levhalarının eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
Kontrol	6,03	6,11
Kontrol	6,37	
Kontrol	6,12	
Kontrol	5,95	
Kontrol	6,34	
Kontrol	5,73	
Kontrol	6,01	
Kontrol	6,12	
Kontrol	6,40	
Kontrol	6,01	
Kontrol	6,16	
Kontrol	5,51	
Kontrol	6,17	
Kontrol	6,49	
Kontrol	6,25	
Kontrol	6,20	
Kontrol	6,36	
Kontrol	6,49	
Kontrol	6,31	
Kontrol	6,16	
Kontrol	6,46	
Kontrol	6,42	
Kontrol	5,81	
Kontrol	6,27	
Kontrol	6,12	
Kontrol	6,33	
Kontrol	6,05	
Kontrol	5,81	
Kontrol	5,71	
Kontrol	5,83	
Kontrol	5,68	
Kontrol	6,17	
Kontrol	5,80	
Kontrol	5,83	
Kontrol	6,36	
Kontrol	6,06	

EK-5. İlk aşamada A sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
AC-A-10	6,22	6,26
AC-A-10	6,65	
AC-A-10	6,41	
AC-A-10	6,67	
AC-A-10	6,04	
AC-A-10	6,18	
AC-A-10	6,10	
AC-A-10	6,16	
AC-A-10	5,88	
AC-A-20	5,73	5,79
AC-A-20	6,24	
AC-A-20	6,18	
AC-A-20	5,67	
AC-A-20	5,59	
AC-A-20	6,04	
AC-A-20	5,49	
AC-A-20	5,67	
AC-A-20	5,50	
AC-A-50	4,28	4,32
AC-A-50	4,54	
AC-A-50	4,20	
AC-A-50	3,82	
AC-A-50	4,73	
AC-A-50	3,80	
AC-A-50	4,26	
AC-A-50	4,47	
AC-A-50	4,78	

EK-6. İlk aşamada B sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
AC-B-10	6,33	5,89
AC-B-10	5,67	
AC-B-10	5,75	
AC-B-10	6,43	
AC-B-10	5,45	
AC-B-10	6,00	
AC-B-10	6,07	
AC-B-10	5,76	
AC-B-10	5,57	
AC-B-20	5,85	5,63
AC-B-20	5,45	
AC-B-20	6,03	
AC-B-20	5,71	
AC-B-20	5,09	
AC-B-20	5,56	
AC-B-20	5,36	
AC-B-20	5,66	
AC-B-20	5,97	
AC-B-50	3,65	4,11
AC-B-50	3,72	
AC-B-50	4,38	
AC-B-50	4,23	
AC-B-50	4,66	
AC-B-50	4,59	
AC-B-50	4,13	
AC-B-50	3,93	
AC-B-50	3,70	

EK-7. İlk aşamada C sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
AC-C-10	5,28	5,47
AC-C-10	5,36	
AC-C-10	5,62	
AC-C-10	5,79	
AC-C-10	5,40	
AC-C-10	5,31	
AC-C-10	5,08	
AC-C-10	5,54	
AC-C-10	5,89	
AC-C-20	4,85	5,11
AC-C-20	5,23	
AC-C-20	4,90	
AC-C-20	4,93	
AC-C-20	5,70	
AC-C-20	5,22	
AC-C-20	5,32	
AC-C-20	4,84	
AC-C-20	4,98	
AC-C-50	3,37	3,74
AC-C-50	3,81	
AC-C-50	4,06	
AC-C-50	4,24	
AC-C-50	3,53	
AC-C-50	3,92	
AC-C-50	3,30	
AC-C-50	3,92	
AC-C-50	3,46	

EK-8. İlk aşamada D sınıfı atık cam ile üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
AC-D-10	5,13	4,79
AC-D-10	4,35	
AC-D-10	5,05	
AC-D-10	4,78	
AC-D-10	4,93	
AC-D-10	5,13	
AC-D-10	4,62	
AC-D-10	4,46	
AC-D-10	4,67	
AC-D-20	4,19	4,27
AC-D-20	4,40	
AC-D-20	3,96	
AC-D-20	4,52	
AC-D-20	4,37	
AC-D-20	4,68	
AC-D-20	4,05	
AC-D-20	4,21	
AC-D-20	4,02	
AC-D-50	3,36	3,37
AC-D-50	3,23	
AC-D-50	3,52	
AC-D-50	3,70	
AC-D-50	3,03	
AC-D-50	2,98	
AC-D-50	3,52	
AC-D-50	3,10	
AC-D-50	3,87	

EK-9. İlk aşamada üretilen kontrol levhalarının su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
Kontrol	24,63	25,32	1425,61	1427,00	35,12	36,11
Kontrol	24,94		1410,64		35,18	
Kontrol	24,70		1443,95		35,66	
Kontrol	22,63		1454,42		32,91	
Kontrol	26,35		1421,33		37,45	
Kontrol	25,60		1439,94		36,86	
Kontrol	23,73		1446,21		34,32	
Kontrol	25,13		1438,71		36,16	
Kontrol	23,94		1435,95		34,38	
Kontrol	24,54		1406,44		34,51	
Kontrol	26,13		1416,50		37,02	
Kontrol	24,76		1439,70		35,64	
Kontrol	25,03		1422,21		35,59	
Kontrol	25,05		1429,53		35,80	
Kontrol	25,07		1439,99		36,10	
Kontrol	24,90		1443,83		35,95	
Kontrol	25,07		1418,60		35,57	
Kontrol	24,97		1410,37		35,22	
Kontrol	25,71		1446,19		37,18	
Kontrol	25,36		1409,90		35,75	
Kontrol	25,06		1428,62		35,80	
Kontrol	26,19		1426,40		37,35	
Kontrol	24,10		1457,11		35,11	
Kontrol	25,04		1444,04		36,16	
Kontrol	24,67		1428,34		35,24	
Kontrol	23,76		1424,56		33,85	
Kontrol	25,23		1423,64		35,93	
Kontrol	28,94		1385,78		40,11	
Kontrol	26,37		1407,26		37,11	
Kontrol	25,51		1421,18		36,25	
Kontrol	27,98		1388,45		38,85	
Kontrol	26,13		1435,84		37,51	
Kontrol	27,14		1413,19		38,36	
Kontrol	25,34		1433,63		36,33	
Kontrol	25,85		1431,10		37,00	
Kontrol	25,86		1422,78		36,79	

EK-10. İlk aşamada A sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
AC-A-10	26,99		1413,89		37,80	
AC-A-10	27,89		1391,42		37,94	
AC-A-10	26,02		1383,98		36,76	
AC-A-10	26,68		1409,67		37,27	
AC-A-10	25,21	26,67	1409,37	1407,84	35,89	37,30
AC-A-10	28,61		1398,01		39,48	
AC-A-10	27,47		1406,91		37,95	
AC-A-10	25,90		1422,84		36,54	
AC-A-10	25,29		1434,48		36,07	
AC-A-20	26,80		1400,87		37,89	
AC-A-20	29,59		1360,16		41,17	
AC-A-20	27,50		1412,95		38,06	
AC-A-20	28,19		1396,87		39,74	
AC-A-20	27,59	27,61	1423,76	1399,25	38,89	38,86
AC-A-20	28,57		1379,73		39,95	
AC-A-20	28,12		1381,64		39,56	
AC-A-20	25,38		1410,96		36,12	
AC-A-20	26,74		1426,34		38,36	
AC-A-50	22,92		1421,12		32,69	
AC-A-50	26,19		1414,25		37,13	
AC-A-50	25,11		1404,36		35,37	
AC-A-50	27,52		1392,13		38,38	
AC-A-50	26,66	25,60	1405,94	1415,34	37,56	36,29
AC-A-50	23,43		1454,44		34,19	
AC-A-50	28,15		1379,67		38,91	
AC-A-50	27,03		1407,42		38,12	
AC-A-50	23,40		1458,77		34,25	

EK-11. İlk aşamada B sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
AC-B-10	24,67		1406,78		35,22	
AC-B-10	26,84		1420,77		37,41	
AC-B-10	27,02		1421,36		38,03	
AC-B-10	25,85		1400,98		36,39	
AC-B-10	25,96	26,16	1393,49	1414,66	36,52	36,82
AC-B-10	26,15		1441,21		37,00	
AC-B-10	26,08		1409,31		36,24	
AC-B-10	26,36		1430,60		37,35	
AC-B-10	26,48		1407,41		37,26	
AC-B-20	26,43		1427,70		37,18	
AC-B-20	27,34		1393,48		38,84	
AC-B-20	25,97		1407,29		36,92	
AC-B-20	26,65		1407,70		37,34	
AC-B-20	28,01	26,66	1406,72	1407,92	39,03	37,71
AC-B-20	24,98		1414,83		36,00	
AC-B-20	27,00		1389,50		38,06	
AC-B-20	26,28		1416,83		37,59	
AC-B-20	27,32		1407,20		38,45	
AC-B-50	25,38		1443,80		36,39	
AC-B-50	25,25		1424,89		35,73	
AC-B-50	26,15		1402,80		36,42	
AC-B-50	25,51		1420,93		36,00	
AC-B-50	24,00	25,79	1473,13	1421,08	35,12	36,36
AC-B-50	27,27		1368,49		37,04	
AC-B-50	25,13		1435,18		35,81	
AC-B-50	27,16		1400,19		37,76	
AC-B-50	26,22		1420,29		36,98	

EK-12. İlk aşamada C sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
AC-C-10	26,84		1405,33		37,71	
AC-C-10	27,72		1404,85		38,94	
AC-C-10	25,60		1433,59		36,70	
AC-C-10	25,90		1416,02		36,68	
AC-C-10	24,90	26,06	1412,19	1412,64	35,17	36,81
AC-C-10	26,96		1402,03		37,80	
AC-C-10	25,48		1440,05		36,69	
AC-C-10	25,34		1393,59		35,32	
AC-C-10	25,82		1406,08		36,31	
AC-C-20	26,38		1425,04		37,59	
AC-C-20	25,54		1407,49		35,95	
AC-C-20	24,61		1455,03		35,81	
AC-C-20	28,42		1399,59		39,78	
AC-C-20	25,56	25,85	1418,30	1420,38	36,26	36,70
AC-C-20	24,65		1423,98		35,11	
AC-C-20	26,20		1418,75		37,18	
AC-C-20	26,62		1409,73		37,52	
AC-C-20	24,61		1425,51		35,09	
AC-C-50	24,94		1396,53		35,08	
AC-C-50	25,76		1398,62		36,28	
AC-C-50	25,53		1416,38		36,41	
AC-C-50	26,13		1412,72		37,17	
AC-C-50	26,21	26,15	1406,49	1406,36	37,12	37,04
AC-C-50	27,72		1398,41		39,04	
AC-C-50	27,77		1396,50		39,06	
AC-C-50	25,06		1415,65		35,72	
AC-C-50	26,29		1415,90		37,48	

EK-13. İlk aşamada D sınıfı atık cam ile üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
AC-D-10	26,40		1437,94		37,96	
AC-D-10	28,34		1418,49		40,20	
AC-D-10	26,99		1403,93	1411,03	37,90	
AC-D-10	26,38		1395,89		36,82	
AC-D-10	27,10	26,91	1409,15		38,18	37,95
AC-D-10	29,80		1374,15		40,95	
AC-D-10	25,59		1425,85		36,49	
AC-D-10	26,24		1406,14		36,90	
AC-D-10	25,31		1427,68		36,13	
AC-D-20	25,01		1424,20		35,36	
AC-D-20	23,68		1421,89		33,44	
AC-D-20	27,25		1404,08	1419,07	37,98	
AC-D-20	29,02		1404,68		40,47	
AC-D-20	25,52	25,83	1431,93		36,29	36,39
AC-D-20	26,10		1432,06		37,12	
AC-D-20	24,63		1433,25		35,05	
AC-D-20	25,61		1410,44		35,86	
AC-D-20	25,70		1409,12		35,96	
AC-D-50	24,98		1427,48		35,66	
AC-D-50	27,40		1407,48		38,56	
AC-D-50	28,80		1391,57	1413,96	40,07	
AC-D-50	27,15		1409,34		38,27	
AC-D-50	25,16	26,25	1427,72		35,92	37,10
AC-D-50	25,86		1421,00		36,75	
AC-D-50	26,05		1408,82		36,70	
AC-D-50	25,20		1419,94		35,78	
AC-D-50	25,61		1412,25		36,17	

EK-14. İkinci aşamada üretilen levhaların eğilme dayanımı değerleri

Numune	Eğilme Dayanımı, MPa	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa
Kontrol	5,97	6,04
Kontrol	5,74	
Kontrol	5,92	
Kontrol	5,87	
Kontrol	6,21	
Kontrol	6,14	
Kontrol	6,32	
Kontrol	6,07	
Kontrol	6,12	
AC-A-4	6,54	6,24
AC-A-4	6,33	
AC-A-4	6,17	
AC-A-4	6,49	
AC-A-4	5,77	
AC-A-4	6,41	
AC-A-4	6,37	
AC-A-4	6,06	
AC-A-4	5,99	
AC-A-8	6,72	6,39
AC-A-8	5,95	
AC-A-8	6,29	
AC-A-8	6,32	
AC-A-8	6,09	
AC-A-8	6,26	
AC-A-8	6,49	
AC-A-8	6,81	
AC-A-8	6,54	
AC-A-12	6,24	6,13
AC-A-12	6,04	
AC-A-12	6,37	
AC-A-12	6,39	
AC-A-12	6,17	
AC-A-12	5,78	
AC-A-12	6,14	
AC-A-12	5,69	
AC-A-12	6,38	
AC-A-16	6,17	5,96
AC-A-16	6,21	
AC-A-16	5,87	
AC-A-16	5,96	
AC-A-16	5,64	
AC-A-16	5,66	
AC-A-16	6,16	
AC-A-16	5,88	
AC-A-16	6,07	

EK-15. İkinci aşamada üretilen levhaların su emme oranı, yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri

Numune	Su Emme Oranı, %	Ortalama Su Emme Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Ortalama Yoğunluk, kg/m^3	Açık Gözeneklilik, %	Ortalama Açık Gözeneklilik, %
Kontrol	25,68		1422,24		36,53	
Kontrol	25,81		1434,85		37,04	
Kontrol	26,15		1440,31		37,67	36,61
Kontrol	25,70		1431,83		36,79	
Kontrol	25,10	25,57	1433,18	1431,50	35,97	
Kontrol	25,43		1439,76		36,62	
Kontrol	25,90		1406,11		36,41	
Kontrol	24,71		1439,85		35,58	
Kontrol	25,68		1435,35		36,86	
AC-A-4	25,78		1421,64		36,15	
AC-A-4	26,35		1414,45		36,76	
AC-A-4	26,77		1420,68		37,51	
AC-A-4	25,86		1415,75		36,11	
AC-A-4	25,82	26,16	1420,66	1419,22	36,18	36,61
AC-A-4	26,86		1428,78		37,85	
AC-A-4	25,7		1411,42		35,77	
AC-A-4	25,67		1427,99		36,16	
AC-A-4	26,61		1411,61		37,04	
AC-A-8	27,04		1425,89		37,65	
AC-A-8	26,63		1402,86		36,17	
AC-A-8	26,33		1413,95		36,28	
AC-A-8	26,50		1412,67		38,78	
AC-A-8	26,48	26,37	1415,91	1415,78	34,71	36,94
AC-A-8	26,08		1408,71		38,27	
AC-A-8	26,45		1426,79		37,20	
AC-A-8	25,93		1409,45		37,39	
AC-A-8	25,91		1425,81		36,03	
AC-A-12	27,01		1413,13		37,74	
AC-A-12	26,38		1405,94		37,50	
AC-A-12	26,26		1412,17		37,11	
AC-A-12	28,07		1407,24		37,40	
AC-A-12	25,10	26,70	1412,15	1410,71	37,02	37,12
AC-A-12	27,78		1420,27		36,96	
AC-A-12	26,68		1402,91		37,48	
AC-A-12	27,14		1419,48		36,50	
AC-A-12	25,87		1403,10		36,35	
AC-A-16	27,14		1395,49		37,88	
AC-A-16	25,66		1407,66		35,93	
AC-A-16	28,03		1409,45		38,60	
AC-A-16	26,94		1411,00		37,75	
AC-A-16	27,27	26,86	1398,00	1408,28	38,31	37,50
AC-A-16	27,17		1417,01		38,04	
AC-A-16	26,12		1416,86		36,81	
AC-A-16	26,63		1401,82		36,68	
AC-A-16	26,79		1408,24		37,47	

EK-16. Kontrol senaryosu için hesaplanan YDD verileri

Parametre	Birim	Kontrol			
		Ham Madde	Lojistik	Üretim	Toplam
Sucul Asitleşme	kg SO_2 eq	1,37E+00	9,62E-02	1,26E+00	2,72E+00
Sucul Ekotoksisite	kg TEG water	1,32E+05	3,38E+03	1,45E+04	1,50E+05
Sucul Ötrofikasyon	kg PO_4 P-lim	7,88E-02	3,60E-03	7,03E-02	1,53E-01
Kanserojenler	kg C_2H_3Cl eq	2,62E+00	2,23E-01	3,54E+00	6,38E+00
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2 eq	3,77E+02	3,70E+01	2,88E+02	7,02E+02
İyonlaştırıcı Radyasyon	Bq C-14 eq	3,35E+03	2,35E+02	1,09E+04	1,45E+04
Arazi İşgali	m^2 org.arable	7,59E+01	1,31E+00	2,47E+00	7,97E+01
Maden Çıkarma	MJ surplus	4,24E+00	4,65E-01	2,22E+00	6,93E+00
Kanserojen Olmayanlar	kg C_2H_3Cl eq	1,37E+01	6,55E-01	2,37E+00	1,67E+01
Kümülatif Enerji Talebi	MJ primary	2,93E+03	6,09E+02	6,08E+03	9,61E+03
Ozon Tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	1,59E-05	5,77E-06	3,16E-05	5,32E-05
Solunum İnorganikleri	kg PM2.5 eq	3,25E-01	2,40E-02	2,10E-01	5,59E-01
Solunum Organikleri	kg C_2H_4 eq	6,18E-02	1,48E-02	4,17E-02	1,18E-01
Karasal Asit/Besin	kg SO_2 eq	6,45E+00	4,52E-01	4,97E+00	1,19E+01
Karasal Ekotoksisite	kg TEG soil	4,12E+04	2,52E+03	3,20E+03	4,69E+04

EK-17. A20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri

Parametre	Birim	AC-A-20			
		Ham Madde	Lojistik	Üretim	Toplam
Sucul Asitleşme	kg SO_2 eq	1,33E+00	8,70E-02	1,26E+00	2,68E+00
Sucul Ekotoksisite	kg TEG water	1,31E+05	2,97E+03	1,45E+04	1,49E+05
Sucul Ötrofikasyon	kg PO_4 P-lim	7,81E-02	3,16E-03	7,03E-02	1,52E-01
Kanserojenler	kg C_2H_3Cl eq	2,59E+00	1,97E-01	3,54E+00	6,32E+00
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2 eq	3,72E+02	3,32E+01	2,78E+02	6,83E+02
İyonlaştırıcı Radyasyon	Bq C-14 eq	3,34E+03	2,06E+02	1,09E+04	1,44E+04
Arazi İşgali	m^2 org.arable	7,58E+01	1,15E+00	2,47E+00	7,94E+01
Maden Çıkarma	MJ surplus	4,17E+00	4,08E-01	2,22E+00	6,80E+00
Kanserojen Olmayanlar	kg C_2H_3Cl eq	1,36E+01	5,75E-01	2,37E+00	1,66E+01
Kümülatif Enerji Talebi	MJ primary	2,89E+03	5,47E+02	5,92E+03	9,36E+03
Ozon Tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	1,58E-05	5,06E-06	3,16E-05	5,24E-05
Solunum İnorganikleri	kg PM2.5 eq	3,19E-01	2,15E-02	2,10E-01	5,50E-01
Solunum Organikleri	kg C_2H_4 eq	6,09E-02	1,30E-02	4,17E-02	1,16E-01
Karasal Asit/Besin	kg SO_2 eq	6,35E+00	4,17E-01	4,97E+00	1,17E+01
Karasal Ekotoksisite	kg TEG soil	4,10E+04	2,22E+03	3,20E+03	4,64E+04

EK-18. B20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri

Parametre	Birim	AC-B-20			
		Ham Madde	Lojistik	Üretim	Toplam
Sucul Asitleşme	kg SO_2 eq	1,33E+00	8,70E-02	1,12E+00	2,54E+00
Sucul Ekotoksisite	kg TEG water	1,31E+05	2,97E+03	1,30E+04	1,47E+05
Sucul Ötrofikasyon	kg PO_4 P-lim	7,81E-02	3,16E-03	6,20E-02	1,43E-01
Kanserojenler	kg C_2H_3Cl eq	2,59E+00	1,97E-01	3,43E+00	6,22E+00
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2 eq	3,72E+02	3,32E+01	2,56E+02	6,61E+02
İyonlaştırıcı Radyasyon	Bq C-14 eq	3,34E+03	2,06E+02	9,60E+03	1,31E+04
Arazi İşgali	m^2 org.arable	7,58E+01	1,15E+00	2,18E+00	7,91E+01
Maden Çıkarma	MJ surplus	4,17E+00	4,08E-01	2,00E+00	6,58E+00
Kanserojen Olmayanlar	kg C_2H_3Cl eq	1,36E+01	5,75E-01	2,14E+00	1,63E+01
Kümülatif Enerji Talebi	MJ primary	2,89E+03	5,47E+02	5,43E+03	8,86E+03
Ozon Tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	1,58E-05	5,06E-06	2,92E-05	5,00E-05
Solunum İnorganikleri	kg PM2.5 eq	3,19E-01	2,15E-02	1,87E-01	5,27E-01
Solunum Organikleri	kg C_2H_4 eq	6,09E-02	1,30E-02	3,95E-02	1,13E-01
Karasal Asit/Besin	kg SO_2 eq	6,35E+00	4,17E-01	4,44E+00	1,12E+01
Karasal Ekotoksisite	kg TEG soil	4,10E+04	2,22E+03	2,85E+03	4,60E+04

EK-19. C20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri

Parametre	Birim	AC-C-20			
		Ham Madde	Lojistik	Üretim	Toplam
Sucul Asitleşme	kg SO_2 eq	1,33E+00	8,70E-02	1,03E+00	2,44E+00
Sucul Ekotoksisite	kg TEG water	1,31E+05	2,97E+03	1,20E+04	1,46E+05
Sucul Ötrofikasyon	kg PO_4 P-lim	7,81E-02	3,16E-03	5,63E-02	1,38E-01
Kanserojenler	kg C_2H_3Cl eq	2,59E+00	1,97E-01	3,36E+00	6,14E+00
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2 eq	3,72E+02	3,32E+01	2,41E+02	6,46E+02
İyonlaştırıcı Radyasyon	Bq C-14 eq	3,34E+03	2,06E+02	8,70E+03	1,22E+04
Arazi İşgali	m^2 org.arable	7,58E+01	1,15E+00	1,98E+00	7,89E+01
Maden Çıkarma	MJ surplus	4,17E+00	4,08E-01	1,85E+00	6,43E+00
Kanserojen Olmayanlar	kg C_2H_3Cl eq	1,36E+01	5,75E-01	1,99E+00	1,62E+01
Kümülatif Enerji Talebi	MJ primary	2,89E+03	5,47E+02	5,09E+03	8,52E+03
Ozon Tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	1,58E-05	5,06E-06	2,75E-05	4,83E-05
Solunum İnorganikleri	kg PM2.5 eq	3,19E-01	2,15E-02	1,71E-01	5,11E-01
Solunum Organikleri	kg C_2H_4 eq	6,09E-02	1,30E-02	3,80E-02	1,12E-01
Karasal Asit/Besin	kg SO_2 eq	6,35E+00	4,17E-01	4,07E+00	1,08E+01
Karasal Ekotoksisite	kg TEG soil	4,10E+04	2,22E+03	2,61E+03	4,58E+04

EK-20. D20 senaryosu için hesaplanan YDD verileri

Parametre	Birim	AC-D-20			
		Ham Madde	Lojistik	Üretim	Toplam
Sucul Asitleşme	kg SO_2 eq	1,33E+00	8,70E-02	9,64E-01	2,38E+00
Sucul Ekotoksisite	kg TEG water	1,31E+05	2,97E+03	1,13E+04	1,46E+05
Sucul Ötrofikasyon	kg PO_4 P-lim	7,81E-02	3,16E-03	5,25E-02	1,34E-01
Kanserojenler	kg C_2H_3Cl eq	2,59E+00	1,97E-01	3,31E+00	6,09E+00
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2 eq	3,72E+02	3,32E+01	2,31E+02	6,36E+02
İyonlaştırıcı Radyasyon	Bq C-14 eq	3,34E+03	2,06E+02	8,10E+03	1,16E+04
Arazi İşgali	m^2 org.arable	7,58E+01	1,15E+00	1,85E+00	7,88E+01
Maden Çıkarma	MJ surplus	4,17E+00	4,08E-01	1,75E+00	6,33E+00
Kanserojen Olmayanlar	kg C_2H_3Cl eq	1,36E+01	5,75E-01	1,88E+00	1,61E+01
Kümülatif Enerji Talebi	MJ primary	2,89E+03	5,47E+02	4,86E+03	8,29E+03
Ozon Tabakası İncelmesi	kg CFC-11 eq	1,58E-05	5,06E-06	2,64E-05	4,72E-05
Solunum İnorganikleri	kg PM2.5 eq	3,19E-01	2,15E-02	1,61E-01	5,01E-01
Solunum Organikleri	kg C_2H_4 eq	6,09E-02	1,30E-02	3,70E-02	1,11E-01
Karasal Asit/Besin	kg SO_2 eq	6,35E+00	4,17E-01	3,82E+00	1,06E+01
Karasal Ekotoksisite	kg TEG soil	4,10E+04	2,22E+03	2,45E+03	4,56E+04



Gazili olmak ayrıcalıktır