



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YAPI CEPHE KAPLAMA MALZEMESİ DIŞ  
SIVA HARÇLARINDA TİTANYUM DİOKSİT  
KULLANIMININ MALZEMENİN FİZİKSEL  
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Muhammed Hilmi KURAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mimarlık Anabilim Dalı**

**Eylül-2024  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Hilmi KURAR tarafından hazırlanan “Yapı Cephe Kaplama Malzemesi Dış Sıva Harçlarında Titanyum Dioksit Kullanımının Malzemenin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması 20/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAŞ

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Elif Tuğba YALAZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

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

## DECLARATION PAGE

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

İmza

Muhammed Hilmi KURAR

Tarih: 20/09/2024

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# YAPI CEPHE KAPLAMA MALZEMESİ DİŞ SIVA HARÇLARINDA TİTANYUM DİOKSİT KULLANIMININ MALZEMENİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

**Muhammed Hilmi KURAR**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mimarlık Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ**

**2024, 112 Sayfa**

**Jüri**

**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ  
Dr. Öğr. Üyesi Elif Tuğba YALAZ  
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAŞ**

Düzensiz nüfus artışı, çarpık kentleşme, araç emisyonları ve benzeri birçok etmen mega kentlerde yoğun etkisi görülen hava kirliliğinin oluşmasına sebep olmaktadır. Hava kirliliği ise ekolojik dengeyi etkileyerek canlı hayatı ve doğal çevre üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır. Bu konu üzerinde çalışan resmi kuruluşların ortaya koyduğu verilere bakıldığında hava kirliliğinin her yıl ciddi ölümlere ve geri dönüşü olmayan hastalıklara yol açtığı görülmektedir. Günümüz ve gelecek nesillerin daha sağlıklı bir çevrede yaşamalarına olanak sağlamak için hava kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunacak çalışmalar yürütülmeli ve teşvik edilmelidir. Bu çalışmaların yapılabileceği alanlardan bazıları mimarlık sektörü ile doğrudan ilişkilidir. Teknolojinin gelişmesiyle üretilen ve yapılarda kullanımıyla cephelerin yaşayan bir organizma gibi faaliyet göstermesini sağlayan yenilikçi malzemeler sayesinde hava kirliliğine müdahale edilebilmektedir. Titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) nanopartiküllerinin cephe kaplama malzemelerine eklenmesiyle, malzemelerin fotokatalizör olarak güneş ışığı ile doğal yollarla tepkimeye girmesine, bunun sonucunda da havadaki kirleticilerin arıtılması ve ayrıca malzeme yüzeylerinin daha uzun süre temiz kalması sağlanmaktadır. Günümüzde, özellikle betonarme inşa edilen yapılarda en yaygın kullanılan cephe kaplama malzemelerinden biri de sıvalardır.  $TiO_2$ 'nin sıva bileşimine dahil edilmesiyle malzemenin fotokatalizör olarak çalışmasının sağlanması ve yapı cephelerinde kullanımıyla hava kirliliğine etki edilebileceği düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında, geleneksel sıva malzemesinin karışımına ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %1, %5, %10, %20 ve %50 oranlarında  $TiO_2$  ilave edilerek yeni malzemelerin fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. En fazla  $TiO_2$  miktarının kullanılabilmesi, fiziksel ve mekanik dayanımların yüksek olduğu optimum karışım oranının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Standartlar doğrultusunda yürütülen çalışma sayesinde, üretilen numuneler fiziksel, mekanik ve mikroyapı deneylerine tabi tutulmuş ve alternatif malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, geleneksel sıva malzemesine %20 oranında  $TiO_2$  ilavesiyle malzemenin birçok fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Sıva karışımına  $TiO_2$  eklenmesiyle hava kirliliği ve karbon salınımının azaltılmasına katkıda bulunmanın yanında, malzemede daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilmesiyle servis ömrü uzun olan ve daha az bakım gerektiren alternatif yapı malzemeleri üretiminin mümkün olduğu düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Fiziksel ve mekanik özellikler, Fotokatalitik sıva, Hava kirliliği, Sürdürülebilir mimarlık, Titanyum dioksit teknolojisi.

## ABSTRACT

### MS THESIS

# THE EFFECT OF TITANIUM DIOXIDE IN EXTERIOR PLASTER MORTARS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL

**Muhammed Hilmi KURAR**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN ARCHITECTURE**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa DERELİ**

**2024, 112 Pages**

**Jury**

**Asst. Prof. Dr. Mustafa DERELİ  
Asst. Prof. Dr. Elif Tuğba YALAZ  
Asst. Prof. Dr. Mustafa KAŞ**

Irregular population growth, unplanned urbanisation, vehicle emissions and many similar factors cause air pollution, which has an intense effect on mega cities. Air pollution affects the ecological balance and leaves negative effects on living life and natural environment. Looking at the data put forward by official organisations working on this issue, it is seen that air pollution causes serious deaths and irreversible diseases every year. In order to enable present and future generations to live in a healthier environment, studies that will contribute to the reduction of air pollution should be carried out and encouraged. Some of the areas where these studies can be carried out are directly related to the architecture sector. Air pollution can be intervened with innovative materials that are produced with the development of technology and enable facades to operate like a living organism with their use in buildings. The addition of titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) nanoparticles to facade coating materials allows the materials to react naturally with sunlight as photocatalysts, resulting in the purification of pollutants in the air and also keeping the material surfaces clean for a longer period of time. Today, one of the most widely used facade coating materials, especially in reinforced concrete buildings, is plasters. It is thought that by incorporating  $\text{TiO}_2$  into the plaster composition, the material can work as a photocatalyst and affect air pollution by using it on building facades.

Within the scope of the study, 1%, 5%, 10%, 20% and 50%  $\text{TiO}_2$  was added to the mixture of traditional plaster material by replacement method with cement by weight and the physical, mechanical and microstructural properties of the new materials were investigated. It was aimed to determine the optimum mixture ratio in which the maximum amount of  $\text{TiO}_2$  can be used and the physical and mechanical strengths are high. Thanks to the study carried out in accordance with the standards, the samples produced were subjected to physical, mechanical and microstructure tests and the usability of alternative materials as building materials was investigated. As a result of the study, it was determined that many physical and mechanical properties of the material can be improved by adding 20%  $\text{TiO}_2$  to the traditional plaster material. In addition to contributing to the reduction of air pollution and carbon emissions by adding  $\text{TiO}_2$  to the plaster mixture, it is thought that it is possible to produce alternative building materials that have a long service life and require less maintenance by obtaining better physical and mechanical properties in the material.

**Keywords:** Air pollution, Photocatalytic plaster, Physical and mechanical properties, Sustainable architecture, Titanium dioxide technology.

## ÖNSÖZ

Toplum sağlığı açısından hava kirliliğinin engellenmesi önemlidir. Bu doğrultuda mimari cephelerin hava kirliliğinin azaltılmasında rol oynaması mümkündür. Nano boyutlu titanyum dioksitin ( $TiO_2$ ) kaplama malzemeleri bünyesinde kullanımıyla etkin bir kirlilik yok edici olacaktır. Bu alışma tam olarak bu hedefle planlanmış, yapılarda en yaygın kullanımı olan sıva bünyesinde değerlendirilmesi düşünölmüştür. Araştırma sonuçlarının toplum sağlığının korunmasına katkı vermesini umut ediyorum.

Hazırlamış olduğum çalışmamın her aşamasında fikir, deneyim ve önerileri ile bana yol gösteren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ'ye,

Bu sürece kadar bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Necmettin Erbakan Üniversitesi Mimarlık Fakölte'si'nin kıymetli hocalarına,

Maddi ve manevi yanımda olan ve beni her konuda destekleyen annem Nemika KURAR'a, babam Ercan KURAR'a ve kardeşim Münir Kağan KURAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Muhammed Hilmi KURAR  
KONYA-2024

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Problem Tanımı .....	4
1.2. Hipotez.....	4
1.3. Amaç-Kapsam .....	5
1.4. Çalışmanın Sınırları .....	5
1.5. Literatür Taraması.....	6
<b>2. KAVRAM ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>10</b>
2.1. Hava Kirliliği .....	10
2.1.1. Hava kirliliğinin nedenleri .....	10
2.1.2. Ulaşım taşıtlarının hava kirliliği oluşumundaki rolü .....	11
2.1.3. Hava kirliliğinin canlı hayatı ve çevre yapısı üzerindeki etkileri .....	12
2.2. Titanyum Dioksit Teknolojisi.....	13
2.2.1. TiO <sub>2</sub> teknolojisinin tanımı ve sağladığı avantajlar .....	13
2.2.2. TiO <sub>2</sub> 'nin çalışma mekanizması .....	13
2.2.3. Titanyum dioksitin kullanıldığı malzemeler .....	15
2.2.4. Fotokatalitik verimliliği etkileyen tasarım kriterleri.....	20
2.2.5. Titanyum dioksit teknolojisinin maliyeti .....	21
2.2.6. Titanyum dioksit teknolojisinin kullanıldığı yapı örnekleri .....	21
2.3. Sıva ve Kullanım Alanları .....	27
2.3.1. Sıva tanımı .....	27
2.3.2. Sıvanın tarihçesi ve geçmiş dönemlerde kullanımı .....	27
2.3.3. Sıvanın yapıda kullanım yeri ve amacı .....	28
2.3.4. Sıvada bulunması gereken özellikler .....	28
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>30</b>
3.1. Materyal .....	32
3.1.1. Titanyum dioksit (TiO <sub>2</sub> ).....	32
3.1.2. Çimento.....	36
3.1.3. Agregat.....	38
3.1.4. Su .....	40
3.2. Yöntem.....	40
3.2.1. Ön deneyler .....	40
3.2.2. Numunelerin üretilmesi .....	44

3.2.3. Fiziksel özellikler.....	48
3.2.4. Mekanik özellikler .....	56
3.2.5. Mikroyapı özellikleri .....	60
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>63</b>
4.1. Bulgular .....	63
4.1.1. Fiziksel özellikler.....	63
4.1.2. Mekanik özellikler .....	75
4.1.3. Mikroyapı özellikleri .....	83
4.2. Tartışma .....	101
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>107</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>109</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	: Numune Yüzey Alanı
A <sub>c</sub>	: Numunenin Yük Doğrultusundaki Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )
b	: Numune Genişliği (mm)
c	: Kapiler Su Emme Katsayısı (kg/m <sup>2</sup> .dak <sup>0.5</sup> )
Ca(OH) <sub>2</sub>	: Kalsiyum Hidroksit
CO	: Karbon Monoksit
°C	: Derece Santigrat (Celsius)
d	: Numune Yüksekliği (mm)
d <sub>h</sub>	: Birim Hacim Kütlesi (g/cm <sup>3</sup> )
e-	: Elektron
F	: Numuneye Uygulanan En Büyük Yük (N)
F <sub>c</sub>	: Basınç Dayanımı Değeri (N/mm <sup>2</sup> )
f <sub>cf</sub>	: Eğilme Dayanımı Değeri (N/mm <sup>2</sup> )
g	: Gram
g/cm <sup>3</sup>	: Yoğunluk
g/mol	: Molar Kütle
G <sub>d</sub>	: Suya Doygun Malzeme Ağırlığı (gr)
G <sub>ds</sub>	: Suya Doygun Malzemelerin Su İçindeki Ağırlığı (g)
G <sub>k</sub>	: Kuru Malzeme Ağırlığı (gr)
H <sup>+</sup>	: Hidrojen
kg	: Kilogram
kg/m <sup>3</sup>	: Yoğunluk
KNO <sub>3</sub>	: Potasyum Nitrat
L	: Mesnet Silindirleri Arasındaki Açıklık (mm)
lt	: Litre
M <sub>1</sub>	: Su İçerisindeki Ağırlık (g) / 10. Dakika
M <sub>2</sub>	: Su İçerisindeki Ağırlık (g) / 90. Dakika
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
mm <sup>2</sup>	: Milimetrekare
N	: Newton
NO <sub>x</sub>	: Azot Dioksitler
O <sub>3</sub>	: Ozon
OH	: Hidroksil Radikali
pH	: Potansiyel Hidrojen
R	: Referans Numune
R <sub>A</sub>	: Numune ve Çözelti Arasındaki Boşluğun (10 mm) Su Buharı Direnci
Si	: Silisyum
S <sub>k</sub>	: Kütlece Su Emme Oranı (%)
S <sub>h</sub>	: Hacimce Su Emme Oranı (%)
SO <sub>2</sub>	: Kükürt Dioksit
T1	: %1 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune
T5	: %5 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune
T10	: %10 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune
T20	: %20 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune
T50	: %50 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune

TiO <sub>2</sub>	: Titanyum Dioksit
V	: Numune Hacmi (cm <sup>3</sup> )
VOCs	: Uçucu Organik Bileşikler
ZnO	: Çinko Oksit
Λ	: Birim Su Buharı Geçirgenliği (kg/m <sup>2</sup> .s.Pa)
ΔG/Δt	: Su Buharı Akımı (kg/s)
Δ <sub>p</sub>	: Ortam Hava ve Çözelti Arasındaki Su Buharı Basınç Farkı

### **Kısaltmalar**

BREEAM	: Building Research Establishment Environmental Assessment Method
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design
NGBS	: National Green Building Standard
PM	: Partikül Maddeler
TS	: Türk Standartları
UV	: Ultraviyole

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu nüfusunun hızlı ve düzensiz bir şekilde artması insan ihtiyacı ve faaliyetlerinin artmasına, bu durum ise şehirlerde düzensiz kentleşme, sanayileşme, araç yoğunluğu ve artan enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu faktörler kirleticilerin oluşmasına ve buna bağlı olarak hava kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Hava kirliliği, etmenleri ve etkilerinin araştırıldığı resmi çalışmalara bakıldığında hava kirliliğinin her yıl ciddi sağlık sorunlarına ve ölümlere yol açtığı görölmektedir. Bu doğrultuda, günümüz ve gelecek nesillerin daha sağlıklı bir çevrede yaşamalarına olanak sağlamak için hava kirliliğini azaltacak çalışmalar yapılmalı ve teşvik edilmelidir.

Bu çalışmaların yapılabileceği alanlardan bazıları mimarlık sektörü ile doğrudan ilişkilidir. Çünkü mimarlık, yapısal ve doğal çevre arasındaki ilişkide hayati bir role sahiptir. Bundan yola çıkarak, yapımı tamamlanan veya gelecekte inşa edilecek olan her bir binanın, yapılı ve doğal olarak sınıflandırılan çevre üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Hayata geçirilen her bir yapı, çevrenin bozulmasına ve iklim değişikliğine sebep olma potansiyeli taşımaktadır. Bu yüzden yapıların inşası sırasında doğal çevreye zarar verilmemesi ve doğal güzelliklerin yapay bir ortama dönüştürülmemesi gerekmektedir.

Günümüzde faaliyet gösteren bazı uluslararası kuruluşlar (LEED, NGBS, BREEAM vb.) mimarlıkta sürdürülebilirliğin artırılması ve çevresel zarar düzeyinin azaltılması yönünde çalışmalar yürütmektedir. Bu uluslararası kuruluşların amaçları, inşa edilecek binaların yapısal ve doğal çevre üzerindeki etkisini indirgeyerek sıfır enerjili bina olmalarını sağlamak ve sürdürülebilirlik için çevre kirliliğini azaltacak yöntemler bulmaktır. Günümüzde mimari ve inşaat alanlarında sayısız yazılım ve program üretilip geliştirilmesine rağmen, iklim değişikliği, yüksek nüfus ve çevresel reform gibi önemli sorunlarla mücadele edebilmek için mimari tasarım anlayışımızda da değişikliğe gitmemiz gerekmektedir. Bu, yeni teknolojiyi takip eden, kullanıcılarına daha sağlıklı bir yaşam sunan ve doğal çevre ile etkileşimlerine olanak sağlayan bir mimari tasarım anlayışı ile mümkündür.

Yapı cepheleri, bina ve çevresi arasındaki ilişkiyi sağlamada önemli rol üstlenmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle üretilen ve yapılarda kullanımıyla cephelerin yaşayan bir organizma gibi faaliyet göstermesini sağlayan yenilikçi malzemeler sayesinde hava kirliliğine müdahale edilebilmektedir. Bu yenilikçi malzemelerden bazıları, malzeme yapılarına fotokatalitik özellik kazandırılmasıyla elde edilmektedir.

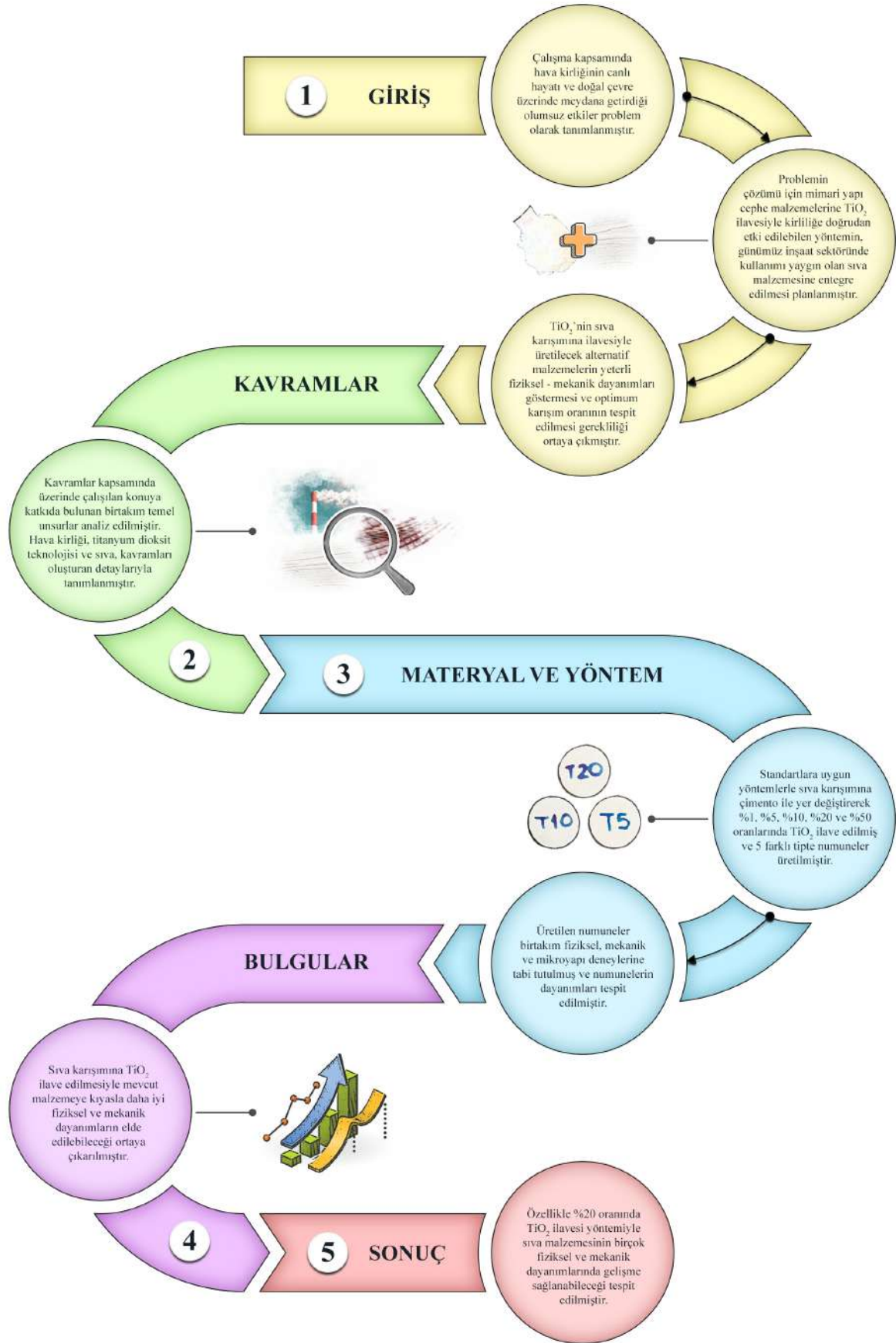
Titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) nanopartiküllerinin cephe kaplama malzemelerine eklenmesi, malzemelerin fotokatalizör olarak güneş ışığı ile doğal yollarla tepkimeye girmesine ve bunun sonucunda da havadaki kirleticilerin arıtılması, malzeme yüzeylerinin daha uzun süre temiz kalması ve bakım ihtiyaçlarının azaltması sağlanmaktadır.

Günümüzde betonarme olarak inşa edilen birçok yapıda hem cephe kaplama hem de dekoratif amaçlı sıva kullanımı tercih edilmektedir. Kum, su, kireç ve çimentonun karıştırılmasıyla elde edilen malzeme, yapılarda düşey yüzeyleri düzeltmek ve dış cephede dokulu dekoratif sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır. Sıva karışımına titanyum dioksit ekleyerek malzemenin fotokatalizör olarak çalışmasını sağlamak ve yapı cephelerinde kullanımıyla havadaki kirleticilere doğrudan etki etmek mümkündür.

Yapı cephelerinde kullanılan malzemeler yürürlükteki standartlara uygun olarak hazırlanmaktadır. Her bir malzeme belirli fiziksel ve mekanik dayanımları sağlamakla yükümlüdür. Sıva karışımına titanyum dioksit eklenmesiyle hava kirliliğine etki etmesi planlanan yenilikçi malzemenin yapılarda kullanımı standartlara olan uygunluğuna ve belirlenen fiziksel ve mekanik gereksinimleri sağlamasıyla ilişkilidir.

Literatürde titanyum dioksit içerikli malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar çoğunlukla beton ve çimento ile sınırlı kalmaktadır. Ülkemizde  $TiO_2$  içerikli malzemelerin kullanımının yaygın olmamasının yanında, yapı uygulamalarında sıklıkla tercih edilen sıvayı fotokatalize etmek üzere yapılmış spesifik çalışmalar bulunmamaktadır. Bu doğrultuda malzeme potansiyelini incelenmek ve kentsel ölçekte kullanılabilmesi için belirli fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutmak gerekmektedir.

Yüksek lisans çalışması ile “Geleneksel Sıva” olarak adlandırılan cephe kaplama malzemesinin fotokatalizör olarak kullanılabilirliği test edilmiş ve hava kirliliğinin azaltılması kapsamında yürütülen çağdaş çözümlere destek olunması amaçlanmıştır. Ayrıca standartlar doğrultusunda yöntemler uygulanarak fiziksel ve mekanik dayanımı yüksek optimum karışım oranları tespit edilmiştir. Bu sayede havadaki kirleticileri filtreleyebilen ve servis ömrü uzun olan sürdürülebilir alternatif yapı malzemesinin elde edilmesi planlanmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Tez akış şeması

## 1.1. Problem Tanımı

Günden güne artan insan faaliyetlerinin artan hava kirliliğine sebep olması, kirliliğin ise canlılar ve çevre üzerinde geri dönüşü olmayan olumsuz etkiler bırakması, bu sorunu ortadan kaldırmaya yardımcı olacak çalışmaların önemini ortaya çıkarmaktadır. Çalışmalar, nüfusu ve buna bağlı olarak enerji tüketimini, sanayileşme ve endüstriyelleşmeyi azaltmakla mümkün olmadığından hava kirliliğinin etkilerinin devamlı olarak hissedilmesi kaçınılmaz olacaktır. Çözüm, kirliliği azaltacak çağdaş yöntemlerin üretilmesi ile mümkündür. Mimarlık alanında yapılan çalışmalar incelediğinde, yapı cephelerinin yaşayan bir organizma gibi kullanılarak hava kirliliğine etki eden sistemler geliştirildiği görülmektedir. Titanyum dioksitin ( $TiO_2$ ) fotokatalizör olarak kullanıldığı sistemler ile yapı cepheleri sayesinde kirlilik azaltılabilmektedir. Bu sistemin ülkemizde de yaygınlaştırılması ve yapı malzemelerinde kullanımı teşvik edilmelidir. Çalışma kapsamında, ülkemizde cephe kaplama malzemesi olarak kullanımı oldukça yaygın olan sıva malzemesinin fotokatalizör olarak kullanılabilirliği ele alınmıştır. Standartlar doğrultusunda üretimi yapılan malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri takip edilmiştir. Bu sayede kullanıma elverişli alternatif malzeme üretimi yapılarak ve uzun vadede hava kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

## 1.2. Hipotez

Bu çalışmanın hipotez ve alt hipotezi aşağıda verildiği şekilde belirlenmiştir.

- **Hipotez**

“ $TiO_2$  nanopartiküllerinin sıva karışımına eklenmesiyle hava kirliliğine etki edebilen ve standartlara uygun alternatif yapı malzemesi üretimi mümkündür.”

- **Alt Hipotez**

“ $TiO_2$  nanopartiküllerinin sıva karışımına eklenmesiyle mevcut malzemeye kıyasla daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzeme üretimi mümkün olacaktır.”

### 1.3. Amaç-Kapsam

Günümüzde inşa edilen yapılarda cephe kaplama malzemesi olarak kullanımı oldukça yaygın olan sıva malzemesinin kuru karışımına  $TiO_2$  nanopartikülleri eklenmesi sonucu elde edilen yeni karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerinin TS standartları doğrultusunda mevcut malzeme ile kıyaslanması, bu sayede yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırması yapılmıştır (Şekil 1.2).

Bu yüksek lisans tezi ile;

- Hava kirliliğini ve karbon salınımı oluşumunu azaltarak sürdürülebilirliği desteklemek,
- Yapı cephelerinde kaplama malzemesi olarak kullanılacak alternatif malzeme üretmek,
- Farklı karışım oranlarının kullanımıyla mevcut malzemeden daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek,
- Literatürde eksikliği bulunan konuyu aydınlatarak gelecekte yapılacak çalışmalara yol göstermek,

gibi önemli kazanımların sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 1.2. Numune üretimi ve test süreci

### 1.4. Çalışmanın Sınırları

- Piyasada farklı mineral ve bağlayıcıların kullanımıyla üretilen birtakım sıva çeşitleri mevcuttur. Çalışma süresince uygulanan prosedürlerin farklı içeriğe sahip numuneler üzerinde denenmesi ile farklı sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, “Geleneksel Sıva” olarak adlandırılan malzeme ile sınırlandırılmaktadır.

- Yürütülen çalışmaların uzun vadedeki amacı hava kirliliğini ve karbon salınımı azaltmada yardımcı olabilecek alternatif yöntem sunmaktır. Titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) nanopartiküllerinin cephe malzemelerinde kullanımıyla hava kirliliğine doğrudan etki ettiği birçok çalışmada kanıtlanmıştır. Ancak bu yüksek lisans tezi, çalışma süresince üretilecek numunelerin hava kirliliğini nasıl ve ne oranda temizleyeceğinden ziyade, fotokatalitik alternatif malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi tespit etmekle sınırlandırılmaktadır.

### 1.5. Literatür Taraması

Literatür taraması kapsamında, hava kirliliğine etki etme amacıyla kullanılan titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) nanopartiküllerinin su, kum, kil ve kireç gibi hammaddelerden elde edilen sıva, beton, çimento ve benzeri malzemelerin içeriğine eklendiği ve malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği deneysel çalışmalar analiz edilmiştir.

- Sopov ve ark. (2020) ana ürün olarak cam elyaf katkılı betona fotokatalitik özellik kazandırarak hava kirleticilerinin azaltılmasına yönelik laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmada fotokatalitik etkinliğin ve  $NO_x$  azalma eğiliminin yanı sıra titanyum dioksitin malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği etkilerde de incelenmiştir. Buna bağlı olarak;
  - Cam elyaf katkılı beton karışımına ilave edilen titanyum dioksit sayesinde, malzemenin basınç dayanımının %5-7 oranında arttığı ve su emiliminin ise %1 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
  - Nano boyuttaki titanyum dioksitin karışıma eklenmesi beton yapısının daha da sıkı olmasına ve ince taneli beton mukavemetinde de artış sağlamıştır.
  - $TiO_2$  içerikli beton karışımının mikroskopik incelemelerinde titanyum dioksit varlığı beyaz bir tabaka olarak fark edilmiştir.
- Nazari ve Riahi (2010) çalışmalarında kendiliğinden yerleşen beton içeriğine farklı oranlarda nano boyutta titanyum dioksit ekleyerek beton dayanımında ve su emme katsayısında meydana gelen değişiklikleri incelemiştir. Sonuçlar, çimento miktarının %4'üne kadar yer değiştirilerek titanyum dioksit ilave edilmesinin ürünün basınç dayanımının ve su geçirgenliğine karşı direncinin arttığını göstermektedir. Bunlara ek olarak çalışma sürecinde iletim kalorimetresi

testlerinde piklerin daha hızlı ortaya çıkması, termogravimetrik analizde daha fazla ağırlık kaybı ve X ışını kırınımı sonuçlarında hidratlı ürünlerle ilgili piklerin daha hızlı ortaya çıkması, titanyum dioksit eklenmesiyle beton ürünlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir.

- Nazari ve Riahi (2011) yaptığı bir diğer çalışmada kendiliğinden sıkışan betonun içeriğine farklı miktarlarda bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve nano boyutta titanyum dioksit ekleyerek betonun dayanımı ve su emme yüzdesini değerlendirilmiştir. Karışımda bulunan portland çimentosunun yer değiştirmesiyle %45 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %4 oranında titanyum dioksit kullanılmış ve beton numunelerin özellikleri incelenmiştir. Çimentonun ağırlıkça %3'üne kadar titanyum dioksit eklenmesinin hidratasyonun erken yaşlarında artan kristal  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarının bir sonucu olarak C-S-H jel oluşumunu hızlandırabildiği ve bunun sayesinde beton mukavemetini artırdığı ve su geçirgenliğine karşı direncini geliştirdiği gözlemlenmiştir.
- Salemi ve ark. (2014) yaptıkları çalışma sonucunda nano  $\text{TiO}_2$  partikül karışıklı betonun, nano  $\text{TiO}_2$  partikül içermeyen betona kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmada, çimento ile maksimum %2 sınırına kadar ortalama 15 nm parçacık boyutuna sahip titanyum dioksitin avantajlı bir şekilde yer değiştirilebileceği tespit edilmiştir. Çimentonun %2'sinin nano titanyum dioksitle değiştirilmesiyle 28 günlük kürün ardından betonun basınç dayanımı sade betona kıyasla %22,71'e kadar artmıştır. Çalışmada yapılan kütle kaybı ve uzunluk değişimi deneylerinde ise, nano  $\text{TiO}_2$  içeren betonun düz betona kıyasla çok daha düşük kütle kaybı ve uzunluk değişimine uğradığı tespit edilmiştir. Düz beton 300 çevrim sonrasında %28,1 uzunluk azalması gösterirken, %2 nano parçacık içeren betonun uzunluğunda %6,04 oranında azalma olmuştur. Çalışmada ayrıca, beton içeriğinde nano parçacıklar kullanıldığında orta boyuttaki gözeneklerin azaldığı, sonuç olarak nano parçacıklar içeren betonun daha yoğun bir mikro yapı nedeniyle düz betona kıyasla daha az su emdiği, böylece donmuş suda oluşacak hacim değişikliği nedeniyle meydana gelecek stresin azalacağı ve betonun dona karşı daha dayanıklı olacağı tespit edilmiştir.
- Wang ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada düşük sıcaklığın çimentolu malzemelerin mühendislik performansını olumsuz yönde etkilediğini ve inşaat verimliliğini engellediğinden yola çıkarak nano titanyum dioksit içerikli

çimentolu malzemelerin düşük sıcaklıktaki performansı üzerinde durmuştur. Deneysel çalışmalarda çimento yerine ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5  $TiO_2$  kullanılarak numuneler hazırlanmış ve  $0^\circ C$ ,  $5^\circ C$ ,  $10^\circ C$  ve  $20^\circ C$  sıcaklıklarda belirli sürelerde küre bırakılmıştır. Numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, çeşitli kürleme sıcaklıklarında titanyum dioksit içerikli ve sade çimentolu malzemelerin performansını incelemek için priz süresi testi, basınç dayanımı testi, eğilme dayanımı testi ve hidrasyon derecesi testine tabi tutulmuştur. Deneylein sonucunda düşük sıcaklığın çimento hidrasyon sürecini geciktirdiği, titanyum dioksit nanopartiküllerinin ise priz süresi testi, hidrasyon derecesi testi ve dayanım testi sonuçları açısından çimento hidrasyonunu hızlandırmada ve priz süresini azaltmada olumlu bir etkiye sahip olduğu ve ağırlıkça %2 titanyum dioksit nanopartikül ilaveli numunenin üstün performans gösterdiği bulunmuştur.

- Florean ve ark. (2024) çimentolu kompozitlerin doğal agregalarının bir kısmını geri dönüştürülmüş cam, tuğla ve yüksek fırın cürufunden elde edilen agregalarla değiştirip, karışıma titanyum dioksit nanopartiküllerini de ekleyerek kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde meydana gelecek değişimleri analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, kullanılan agrega türünden bağımsız olarak titanyum dioksitin kompozit kütleyle eklenmesi, sertleşmiş durumdaki yoğunluğu artırdığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca karışıma eklenen %3 veya %4 oranındaki titanyum dioksitin, doğal agregaların yerine eklenen geri dönüştürülmüş agregaların niteliğine bağlı olarak  $43,3-70,13 N/mm^2$  arasındaki değerlerle maksimum basınç dayanımı ortaya çıkardığı tespit edilmiştir.
- Keivan ve ark. (2013) deneysel çalışmalarında normal betonun karışımına  $TiO_2$  (titanyum dioksit) ve  $ZnO$  (çinko oksit) nanopartikülleri ekleyerek betonun basınç dayanımı ve gaz geçirgenliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karışıma eklenen titanyum dioksitin çimentoya ağırlıkça %4 oranına kadar kullanılmasının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirebileceği sonucu ortaya çıkmıştır. Karışıma eklenen çinko oksitin ise priz süresini geciktirdiği ve karışımdaki  $ZnO$  miktarının artmasının beton içindeki hidrasyon sürecini tamamen durdurduğu, harç oluşumunu engellediği tespit edilmiştir.
- Yu ve ark. (2018) yaptıkları çalışmalarda farklı sıcaklık işlemlerine tabi tutulan farklı ağırlık oranlarındaki titanyum dioksit nanopartiküllerinin betonun basınç özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, titanyum dioksitin ağırlık oranının belirli bir miktarda artmasının, beton mukavemetinin de

buna bağı olarak artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.  $TiO_2$  nanopartiküllerinin betondaki ağırlık oranı %2 olduğunda, betonun basınç dayanımı en yüksek seviyeye ulaşmış ve bu oranın  $TiO_2$  nanopartikülleri içermeyen düz betondan %7 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.  $155^\circ C$  yüksek sıcaklık işlemi altında ise betonun basınç dayanımının işlem süresinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık, dayanım azalmasına yol açan çatlaklara neden olmuş ve beton dayanımı artıran hidrasyon reaksiyonunu hızlandırmıştır.

- Jalal ve ark. (2013) yüksek dayanımlı kendiliğinden sıkışan betonun karışımına uçucu kül ve titanyum dioksit ilave edip karışımın mekanik, mikro yapısal ve termal özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Bu bağlamda, Portland çimentosu ağırlıkça %15'e kadar atık kül ve ağırlıkça %5'e kadar titanyum dioksit nanopartikülleri ile yer değiştirilmiş ve kendiliğinden sıkışan beton numunelerinin özellikleri ölçülmüştür. Enerji tasarrufu ve atık malzemelerin geri dönüşümü amacıyla, doğal bir puzolan olarak atık kül ilavesinin betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini daha yüksek yaşlarda iyileştirebileceği bulunmuştur. Çimentonun ağırlıkça %4'e kadar yer değiştirildiği  $TiO_2$  nanopartiküllerinin ise, hidrasyonun erken yaşlarında artan kristal  $Ca(OH)_2$  miktarının bir sonucu olarak C-S-H jel oluşumunu hızlandırabileceği ve dolayısıyla betonun mikro yapısını iyileştirerek dayanıklılıkla ilgili özelliklerin iyileşmesine ve betonun mukavemetinin artmasına sebep olabileceği tespit edilmiştir.

Literatür incelendiğinde, titanyum dioksitin ( $TiO_2$ ) çoğunlukla beton ve çimento karışımına ilave edildiği ve malzemelerin fiziksel ve mekanik dayanımları üzerindeki etkisinin tespit edildiği çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Karışımlara belirli oranlarda titanyum dioksit ilavesiyle malzemelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su geçirgenliğine karşı direnci ve mikro yapısı gibi birçok fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanabildiği görülmektedir.

## 2. KAVRAM ARAŞTIRMASI

Bu bölümde üzerinde çalışılan konuya katkıda bulunan birtakım kavramlar ele alınmaktadır. Bu doğrultuda hava kirliliği, titanyum dioksit teknolojisi ve yapı malzemesi olarak sıva, yapılan kavram araştırması sonucu elde edilen detaylarıyla açıklanmıştır.

### 2.1. Hava Kirliliği

Hava kirliliği, havanın yapısının ve içeriğindeki doğal bileşenlerinin birçok etmeden dolayı değişmesi, havada bulunan katı, sıvı ve gaz formundaki yabancı maddelerin ekolojik dengeyi etkilemesi ve canlı hayatına zararlı olabilecek seviyeye gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Atmosfere karışan partikül maddeler (PM), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot dioksitler (NO<sub>x</sub>), ozon (O<sub>3</sub>) gibi gazlar hava kirliliğinin oluşmasına sebep olan etmenlerden bazılarıdır. Bunların dışında yağış, rüzgâr, sıcaklık gibi meteorolojik faktörlerle, konum ve topografik yapı da hava kirliliğine etki etmektedir. Ülke ve şehirlerdeki yeşil alanların yeterli sayıda bulunmaması, bununla beraber yapılaşma ve kentleşmenin de plansız şekilde yapılması, sanayi ve benzeri alanlarda kullanılan yakıtlar da hava kirliliğinin oluşumunda büyük pay sahibi olan etmenlerdir (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2019).

#### 2.1.1. Hava kirliliğinin nedenleri

Hava kirliliği, insan faaliyetlerinden kaynaklı oluşmasının yanı sıra çöllerde bulunan tozlar ve yanardağı patlamaları gibi doğal kaynaklı da meydana gelmektedir. İnsan faaliyetlerinin meydana getirdiği hava kirliliğinin doğal kaynaklı oluşan hava kirliliğine oranla daha fazla olduğu belirtilmektedir. Fakat insan kaynaklı meydana gelen hava kirliliği gereken tedbirlerin alınması durumunda önlenabilmektedir. Hava kirliliğine sebep olan insan faaliyetlerinden bazıları aşağıda gösterildiği gibi sıralanabilmektedir.

- Sanayi ve santral gibi yapılarda kullanılan fosil yakıtlar,
- Madencilik uygulamaları ve endüstriyel tesisler,
- Ulaşım amaçlı kullanılan yakıtlar,
- Isınmak ve yemek yapmak için yakılan odun ve kömürler,
- İnşaat faaliyetlerinden kaynaklanan tozlar,
- Anızların yakılması ve benzeri atıklar.

Bu maddelerin tamamı ciddi düzeyde hava kirliliğine sebep olmaktadır. Ancak, özellikle sanayi ve santral kaynaklı kirleticiler, asit yağmurlarına ve iklim değişikliğine sebep olmanın yanı sıra insanlar üzerinde de ciddi sağlık sorunları oluşturmaktadır. Bacalardan yayılan ve boyutu saç telinden daha ince olduğu bilinen partikül maddeler insan kanına kolayca karışabilmektedir ve uzun vadede geri dönüşü olmayan zararlar oluşturabilmektedir (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2019).

### 2.1.2. Ulaşım taşıtlarının hava kirliliği oluşumundaki rolü

Havanın kirlenmesine birçok farklı etmen sebep olmasına rağmen, yapılan çalışmalar ulaşım taşıtlarının dünyadaki hava kirleticilerinin %60'ından sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Kinetik enerji üretmek için benzin ve dizel gibi yakıtlara ihtiyaç duyan her türlü ulaşım aracı, önemli bir hava kirliliği kaynağı olarak kabul edilmektedir. Özellikle benzin ve dizel gibi yakıtlar, hava kirliliğine sebep olan maddelerden bazıları olarak bilinmektedir. Ülkelerdeki araç sayısının artması, her geçen gün artan hava kirliliğini meydana getirmektedir. Araçlar çalıştıkları süre boyunca dizel ve benzin yakıtlarından kaynaklanan egzoz gazlarını yayarak havadaki kirleticilerin artmasına sebep olmaktadır. Benzinin yanması sonucunda karbondioksit, hidrokarbonlar, kükürt oksitler ve hoş olmayan kokular ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.1). Bu ortaya çıkan maddelerin tamamı ciddi düzeyde hava kirliliğine sebep olmaktadır (Moafaq Al-Zaidi ve Sarkis Markaryan, 2020).



Şekil 2.1. İşlek yollarda ulaşım taşıtlarından kaynaklanan hava kirliliği (NTV, 2021)

### 2.1.3. Hava kirliliğinin canlı hayatı ve çevre yapısı üzerindeki etkileri

Mevcut verilere bakıldığında, Dünya Sağlık Örgütü'nün limitlerine göre dünya nüfusunun %91'i kirli hava solumaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün 2014'te yayınladığı rapor, 2012 yılında yaklaşık 7 milyon insanın hava kirliliği kaynaklı hayatlarını kaybettiğini belirtmektedir. Bu 7 milyonun yaklaşık 4 milyonu evsel hava kirliliğinden, kalanları ise ortam (çevre) havası kirliliğinden meydana gelmiştir. Kanada Tabipler Birliği ise, Kanada'daki hava kirliliğinin 21.000 erken ölüme ve fazladan yaklaşık 700.000 hastane ziyaretine sebep olduğunu bildirmiştir. Türkiye'de yapılan bir çalışma ise hava kirliliğinden kaynaklı ölümlerin trafik kazalarından kaynaklanan ölümlerden yaklaşık 7 kat daha fazla olduğunu ortaya çıkarmıştır. Eğer 2017 yılında Türkiye genelindeki ortalama hava kirliliği değeri Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği değerde olsaydı, ülke genelinde yaşanan ölümlerin %13'ünün önlenebileceği düşünülmektedir. 2018 yılındaki hava kalitesi ise, ulusal sınır değerleri doğrultusunda değerlendirildiğinde, ülkemizdeki 81 ilin yarısından fazlası (%56) kirli hava solumuştur. Bir çalışma, hava kirliliğinin doğurganlığı olumsuz yönde etkilediğini, bacalardan ve araç egzozlarından yayılan partikül maddelerin anne karnındaki bebeğe bile etki ettiğini ortaya koymaktadır. Yapılan başka çalışmalarda ise hava kirliliğinin diyabet, astım, otizm, ani bebek ölümü, bronşit, zatürre ve zekâ geriliği gibi ciddi sağlık sorunlarına sebep olduğuna değinilmiştir (Mccarroll ve Bradley, 1966; Temiz Hava Hakkı Platformu, 2019).

Hava kirliliğine dair istatistiklere, canlı hayatı ve çevre yapısı üzerindeki etkilerine bakıldığında bu sorunu ortadan kaldıracı çözümler gündeme gelmektedir. Kirliliğin çözümünün genel olarak emisyonları azaltmak ile mümkün olduğu bilinmesine ve bu doğrultuda verilen uluslararası çabalara rağmen, havadaki kirleticilerin ve bu kirleticileri oluşturan insan kaynaklarının da sürekli olarak artması, tehlikeli ve geri dönüşü olmayan sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Hava kirliliği kaynaklı mevcut sorunlardan ve gelecekte meydana gelebilecek olanlardan kaçınmak için köklü endüstriyel değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Bu değişikliklerden bazıları mimari tasarım ve kentsel planlama alanı ile doğrudan ilgilidir. Çünkü mimarlar büyük ve küçük ölçekte yaptıkları tasarımlar ile artan hava kirliliği ve çevresel bozulma sorunlarına çözüm bulmada kilit rol oynayabilmektedir. Bu doğrultuda, kirliliğe yönelik davranışları düzeltmek ve kirliliği azaltmak için daha etkili ve verimli binalar tasarlayabilmektedir (Carducci ve ark., 2017). Gelişen teknoloji sayesinde mimari tasarımcı tarafından kullanılabilen ve hava kirliliğine doğrudan etki edebilen birçok yenilikçi yapı malzemesi

üretilmektedir. Bu malzemelerden bazıları içerisinde titanyum dioksit bulunan ve bu teknoloji ile üretilen mimari yapı malzemeleridir.

## **2.2. Titanyum Dioksit Teknolojisi**

Bu bölümde titanyum dioksit teknolojisinin tanımı, sağladığı avantajlar, çalışma mekanizması, içeriğine entegre edilebileceği mimari yapı malzemeleri, yapılarda kullanım durumunda tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken kriterler, maliyeti ve TiO<sub>2</sub> teknolojisinin kullanıldığı mimari yapı örnekleri ele alınmaktadır.

### **2.2.1. TiO<sub>2</sub> teknolojisinin tanımı ve sağladığı avantajlar**

Bu yenilikçi teknoloji içeriği sayesinde, kirleticiler tarafından kirlenmiş havayı uygulandıkları yüzeyler aracılığı ile filtreleme özelliği sunmaktadır. Titanyum dioksit içerikli yapı malzemeleri sayesinde günde yaklaşık olarak 10.000 aracın oluşturduğu hava kirliliği temizlenebilmektedir. Bu, TiO<sub>2</sub> içerikli malzemelerin doğal yollarla girdiği tepkimeler sayesinde meydana gelmektedir. Titanyum dioksit, güneş ışığı ile tepkimeye girip reaksiyon vererek, nitrojen oksitler (NO<sub>x</sub>), uçucu organik bileşikler (VOCs), karbon monoksit (CO) ve ozon gibi havayı kirleten maddeleri kalsiyum nitrat gibi biyolojik olarak tolere edilebilir ürünlere dönüştüren yarı iletken bir malzemedir. Güneş ışığı ile gerçekleşen tepkimenin ardından ortaya çıkan tolere edilebilir ürünler (tuzlar) malzeme yüzeylerine yapışır ve yağmurların yağmasıyla cephe yüzeylerinden kolayca çıkabilmektedir (Akbari ve Berdahl, 2008).

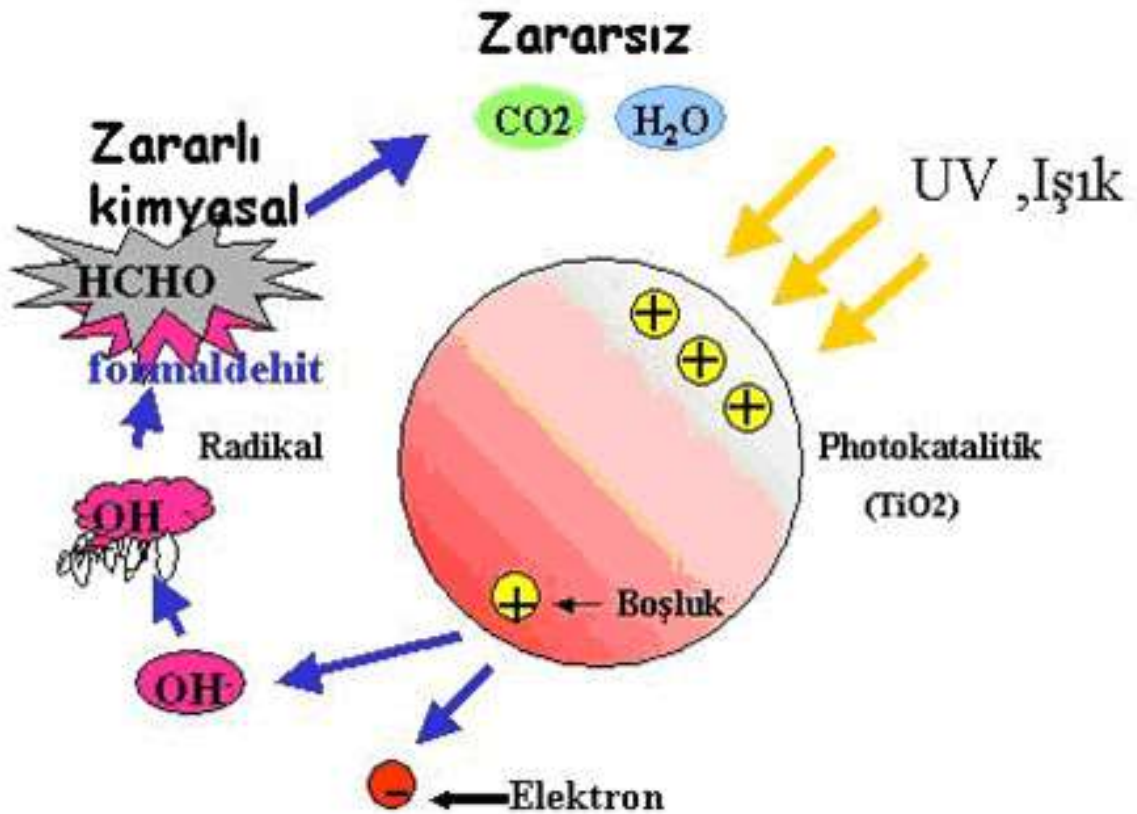
Yarı iletken malzeme ile güneş ışığı tepkimesinin sağladığı bir diğer avantaj ise; TiO<sub>2</sub> içerikli malzemelerin havadaki kirleticileri filtrelemenin yanı sıra malzeme üzerinde oluşan kirliliği de temizlemesidir. Yapılan bazı çalışmalar, içeriğinde titanyum dioksit kullanılan malzemelerin, kullanılmayan malzemelere oranla uzun vadede daha temiz kaldığını ve bu malzemeleri temizlemek için yapılacak masrafların da azalacağını ortaya koymuştur (Demir, 2011).

### **2.2.2. TiO<sub>2</sub>'nin çalışma mekanizması**

Güneş ışınları veya aydınlatma kaynaklı UV ışınları sayesinde, yüzeylerinde hidroksil radikalleri oluşması sonucu zararlı organik kirleticilerin parçalanıp

karbondioksit ve su gibi zararsız ürünlerin ortaya çıktığı tepkimeler “Fotokataliz Mekanizma” olarak adlandırılmaktadır.

TiO<sub>2</sub> fotokatalizörü, aydınlatma kaynağından gelen UV ışığındaki enerji sayesinde yüzeyinde oksidasyon (hidrojen miktarının azalıp oksijen miktarının artması olayı) gerçekleşen bir yarı iletkenidir. Yarı iletken malzemeler atomik yapıları içerisinde enerji seviyelerini belirten dolu valans ve boş iletkenlik bandına sahiptir. Yüzeyle temas eden UV ışığındaki enerji sayesinde valans bandındaki elektronlar (e<sup>-</sup>) iletkenlik bandına geçmektedir ve valans bandında boşluklar oluşmaktadır. Bunun sonucunda ise elektron (e<sup>-</sup>) ve hidrojen (H<sup>+</sup>) çiftleri meydana gelmektedir. H<sup>+</sup> yüksek oksidasyon gücü sayesinde su ile tepkimeye girmektedir ve güçlü bir oksitleyici olarak bilinen hidroksil radikalini (OH) oluşturmaktadır. Hidroksil gibi radikaller, malzeme yüzeyinin temas halinde bulunduğu havadaki kirleticiler ile reaksiyona girmektedir ve bu kirleticileri karbondioksit ve su gibi zararsız ürünlere ayrıştırabilmektedir (Şekil 2.2) (Yurddaşkal ve ark., 2019).



Şekil 2.2. Titanyum dioksit tepkimesi (Kimyager, 2012)

### 2.2.3. Titanyum dioksitin kullanıldığı malzemeler

TiO<sub>2</sub>'nin zehirli bir malzeme olmaması, termal stabilitesinin iyi olması ve temin fiyatının da çok pahalı olmaması gibi özellikleri, malzemenin birçok sektör ve üründe yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmektedir (Karagüler ve Yüksel, 2011).

Mimari boyalar ve kaplamalar, yapı cepheleri ve düşey yüzeylerde kullanılan malzemeler, çatı kiremitleri, yol ve kaldırım taşları, beton ve çimento içerikli malzemeler, asfalt, seramik karolar, mutfak ve banyo gibi mekanlarda kullanılan iç mekân döşemeleri, çatı kiremitleri, alüminyum kaplama paneller, camlar ve aynalar titanyum dioksitin entegre edilebileceği başlıca malzemelerdendir (Demir, 2011).

#### 2.2.3.1. Çimento içerikli kaldırım taşları ve yol kaplama malzemeleri

Sürdürülebilir kentler ve sağlıklı yaşam alanları oluşturmak sadece inşa edilen yapılarda kullanılacak yenilikçi teknolojilere dayanmamaktadır. Kentlerin oluşumunda yol, kaldırım ve parke taşı gibi ögeler de büyük pay sahibi olmaktadır. Bu sebeple, titanyum dioksit kullanımının yaygınlaştırılabileceği alanlar kentlerin oluşmasında pay sahibi olan ve kentte büyük alanları kaplayan bu ögelerdir.

Bu kapsamda yapılan bazı araştırmalar ve deneysel çalışmalar, titanyum dioksitin çimento içerikli malzemelerde kullanımının hem hava kalitesi açısından hem de malzemenin kendi kendini temizlemesiyle olumlu sonuçların alındığını ortaya koymaktadır. Titanyum dioksitin su, çimento ve kum içerikli malzemelere karıştırılması iki farklı şekilde yapılabilmektedir. İlk yöntem, kuru karışım esnasında su katılıp malzeme harcı elde edilmeden önce titanyum dioksit tozunun çimento ve kum karışımına ilave edilmesiyle yapılmaktadır. İlave işleminden sonra yapılan karışım aşamasıyla titanyum dioksit içerikli harç elde edilebilmektedir (Şekil 2.3). İkinci yöntem ise, geçirdiği kimyasal aşamalarla sıvı süspansiyon haline getirilen TiO<sub>2</sub>'nin malzeme yüzeylerine püskürtülmesi ile yapılmaktadır (Şekil 2.4).



**Şekil 2.3.** TiO<sub>2</sub> karışimli çimento harcının asfalta dökülmesi işlemi (Crispino, 2010)



**Şekil 2.4.** TiO<sub>2</sub> sıvı süspansiyonun püskürtmeli uygulanması (Crispino, 2010)

Titanyum dioksitin uygulanmasındaki önemli konulardan birisi de TiO<sub>2</sub>'nin kuru karışım esnasında diğer malzemelerle karıştırıldığı yöntemin, sıvı süspansiyon ile malzeme yüzeylerine püskürtme yöntemine göre daha kalıcı ve sağlam bir uygulama olmasıdır. Kuru karışım ile üretilen malzemeler uzun yıllar işlevini korurken, püskürtme yoluyla elde edilen malzemelerin her 4-5 yılda bir değiştirilmesi gerekmektedir (Shen ve ark., 2015).

TiO<sub>2</sub> içerikli malzemeler UV ışınları ile girdikleri tepkime sonucunda havadaki kirleticileri zararsız tuza dönüştürmektedir. Bu tuzun yağmur ve rüzgâr gibi doğal bileşenlerle malzeme yüzeyinden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu sebeple, içeriğinde titanyum dioksit kullanılan kaldırım taşları ve yol yüzeyleri, balık sırtı eğimi ile inşa

edildikleri takdirde yüzeylerinde oluşacak tuzdan kolayca kurtulabilecektir (Akalin ve ark., 2015).

### 2.2.3.2. Sıva ve betonlar

Beton günümüzde en sık kullanılan yapı malzemelerinden birisidir ve kullanıldığı ilk günden itibaren sürekli gelişim içinde olmuştur. Çoğunlukla taşıyıcı işleviyle kullanılmış olsa da çeşitli mimari akımlar sayesinde zaman zaman estetik amaçlı olarak da kullanılmaktadır (Karagüler ve Yüksel, 2011). Sıvalar da günümüz mimarisinde iç ve dış düşey yüzeyleri kaplamak için sıklıkla kullanılan malzemelerdir birisidir. Özellikle günümüz Türkiye mimarisinde betonarme inşa edilen hemen hemen her yapının düşey yüzeyleri sıvalar ile kaplanmaktadır. İçeriği kum, su, kireç ve çimento gibi malzemeler kullanılarak hazırlanan mimari yapı malzemeleri, titanyum dioksit karıştırılarak fotokatalitik özelliğe sahip olabilmektedir. Malzemeler bu sayede hem kendi yüzeylerinde oluşan kirliliği hem de havada bulunan kirleticileri temizleyerek sürdürülebilir kentlerin oluşmasına katkıda bulunabilmektedir (Şekil 2.5). Titanyum dioksit, beton ve sıva harcının içerisine çimento içerikli malzemelerde olduğu gibi iki farklı yöntemle karıştırılabilmektedir (Acar, 2022).



Şekil 2.5. Cephesinde TiO<sub>2</sub> içerikli malzeme kullanılan Matrice di Cittanova Kilisesi'nin önceki ve sonraki hali (Acar, 2022)

### 2.2.3.3. Seramik karolar

Seramikler günümüzde daha çok iç mekânlarda (banyo, mutfak gibi ıslak hacimler) kullanılmasına rağmen zaman zaman dış mekân kaplamalarında da tercih edilen bir yapı malzemesidir. Seramik malzemelere de  $TiO_2$  ilavesiyle fotokatalitik özellik verilebilmektedir. Bu işlem, içerisinde titanyum dioksit bulunan sıvı süspansiyonun malzeme yüzeyine püskürtülmesi ile yapılmaktadır. Püskürtme işleminin ardından 600-800 derece sıcaklık aralığında sinterleme işlemi yapılır ve bu sayede  $TiO_2$  ince bir katman halinde seramik yüzeyine sıkı bir şekilde bağlanabilmektedir (Chen ve Poon, 2009).

$TiO_2$  içerikli seramiklerin kullanıldığı en iyi örneklerden birisi, Daniel Libeskind'in 2015 yılında İtalya'da tasarlamış olduğu Vanke Pavilyonu adlı eseridir. Yapı cephesinde, mimarın İtalyan şirket Casalgrande Padana ile tasarladığı ve ışığa göre değişen metalik renge sahip 4000 adet fotokatalitik seramik bulunmaktadır (Şekil 2.6, 2.7).



Şekil 2.6, 2.7. Vanke Pavilyonu'nun cephesinde bulunan fotokatalitik seramikler (ArchDaily, 2015)

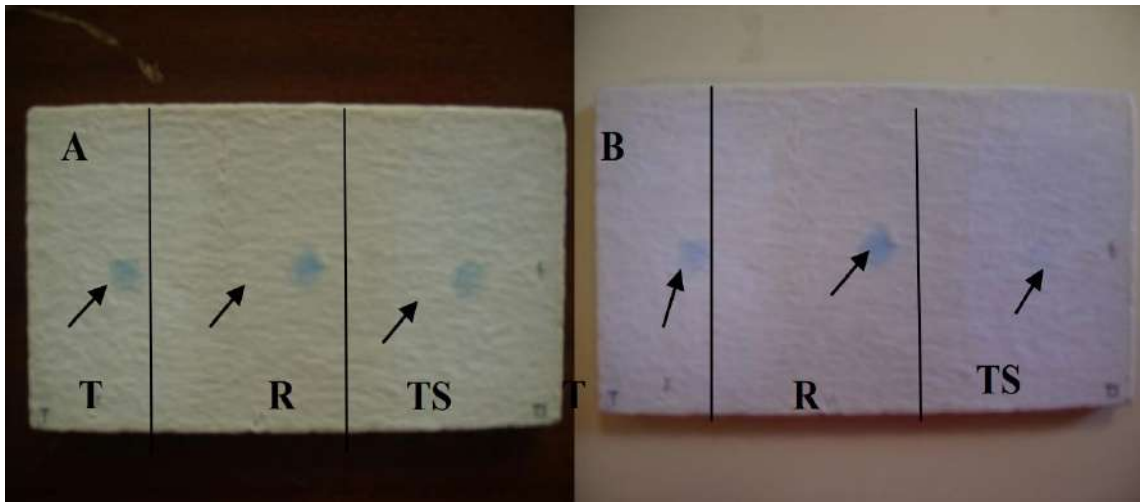
### 2.2.3.4. İç ve dış inşaat boya ları

Yapılarda sıklıkla kullanılan bir diğer malzeme ise inşaat boya larıdır. İç ve dış mekânlarda kullanılan boyalara iki farklı yöntemle fotokatalitik özellik kazandırılabilir. Bu yöntemlerden birisi doğrudan boya yüzeyine kaplama yapılması, diğeri ise boya içinde bulunan bileşenlere dahil edilip daha kararlı bir yapı oluşturulmasıdır.

Her inşaat boyasının aynı olmaması, yapı itibari ile boya larının farklılık göstermesi, titanyum dioksitin malzeme içine entegrasyonu aşamasında dikkat edilmesi gereken konulardan birisidir. Bu konuda yapılan bir çalışmada, boyanın yapısına göre fotokatalitik etkinliğin değişebileceğine değinilmiştir. Çalışmada, organik içerikli

boyalarda titanyum dioksit kullanılması halinde boya içerisindeki organik bağlayıcıların ayrışmasından dolayı malzemede bozulmalar görülebileceği ve fotokatalitik özelliğin azalabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Chen ve Poon, 2009).

İnşaat boya ile ilgili yapılan farklı bir çalışmada ise, malzeme içerisinde kullanılan titanyum dioksitle beraber silis (Si) katkı TiO<sub>2</sub> içeriği de deneye tabi tutulmuştur. Aynı süre içerisinde yapılan deney sonucunda, silis ve titanyum dioksit katkı boya, sadece titanyum dioksit katkı boyaya karşı yüzeyinde bulunan kirliliğin daha fazlasını çözmüştür (Demir, 2011). Bu durum silis kaynağının, TiO<sub>2</sub>'nin fotokatalitik aktivitesini artırdığını göstermektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Metilen mavisi ile kirlenilen boyanın ilk hali (A) ve 20 dakika sonrası (B) (Demir, 2011)

### 2.2.3.5. Camlarda kullanılan filmler

TiO<sub>2</sub>'nin ilave edilmesi ile fotokatalitik aktivasyona sahip olabilen bir diğer malzeme ise ince film kaplamalardır. Ultrason sprey piroliz tekniği ile yapılan püskürtme işlemi sayesinde malzeme hem kendi yüzeyini hem de hava kirliliğini temizleyebilmektedir.

Fotokatalitik özellikli ince filmler genelde dış cephesinde cam sistem bulunan yüksek katlı yapılarda tercih edilmektedir (Şekil 2.9). Yükseklik arttıkça temizliğin daha zor olması, kendi yüzeyini temizleyebilen ince filmlerin yüksek katlı yapılarda kullanılmasını teşvik etmektedir. Malzemenin kendi kendini temizleyebiliyor olması hiç temizliğe ihtiyaç duymadığı anlamına gelmemektedir. TiO<sub>2</sub> içerikli cam yüzeyleri de standart cam sistemlerine göre daha az sıklıkla da olsa temizlenmelidir (Acar, 2022).

Ayrıca malzemenin ince bir kaplama malzemesi olması, zamanla dış ortam koşullarının da etkisiyle aşınma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu sebeple 4-5 sene gibi aralıklarla yenilenmesi gerekebilmektedir.



Şekil 2.9. Cam sistemi TiO<sub>2</sub> bazlı ince filmle kaplı olan Brive-la-Gaillarde Hastanesi (Curcic, 2018)

#### 2.2.4. Fotokatalitik verimliliği etkileyen tasarım kriterleri

Yapı malzemelerinin içine entegre edilen TiO<sub>2</sub> sayesinde malzemeler hem kendi yüzeylerini hem de hava kirliliğini temizleyebiliyor olsa da bu durum bazı tasarım kriterleriyle doğrudan ilişkilidir. Mimari yapılardaki yüzey eğimi, panel formu ve yüzey dokusu malzemelerin fotokatalitik işlevlerini etkileyen unsurlardır (Cardellicchio, 2019; Göçer, 2005).

##### 2.2.4.1. Yüzey eğimi ve panel formu

Yağmur ve rüzgâr gibi etmenler yapı cepheleri için en temel ve ideal doğal temizleyicilerdir. Bazı yapılardaki tasarım kararları farklı yüzey eğimleri ve panel formlarına, bu eğim ve panel formları ise doğal temizleyicilerin yapı cephesindeki bazı kısımlara ulaşamamasına sebep olmaktadır. TiO<sub>2</sub> içerikli malzemeler, her ne kadar kendi yüzeylerini temizleyebilseler de yağmur ve rüzgâr temas etmediği takdirde yüzeylerindeki kirlerin birikme oranı artmaktadır (Şekil 2.10). Tasarım aşamasında veya fotokatalitik özellikli malzeme kullanımında, aktivitenin yüzey eğimi ve panel formu ile bağlantılı olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 2.10. Dives in Misericordia Kilisesi'nin cephesinde biriken kirlilik (Wikimeadia, 2012)

### 2.2.5. Titanyum dioksit teknolojisinin maliyeti

Hava kirliliğine çözüm sunan sistemin ortaya çıkaracağı toplam maliyet, uygulanacağı koşullara göre farklılık gösterecektir. Ancak yapılan bazı çalışmalar, titanyum dioksitin yüzeyleri kaplamak için kullanıldığında metrekare başına yaklaşık olarak 2,20 dolar ek maliyet ile oldukça ekonomik bir sistem olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Ek işçiliğin de dahil edildiği durumlarda ise metrekare başına toplam maliyet 8 dolara kadar çıkabilmektedir. Yenilikçi sistemin kullanılması durumunda kısa vadede ortaya çıkaracağı ek maliyetler, uzun vadede sağlayacağı tasarruf sayesinde sorun olmaktan çıkmaktadır. Aktif titanyum dioksit teknolojisi, kullanıldığı cephelerde binaların güneş ısısı kazanma seviyesini azaltmaktadır. Bu durum, yaz aylarında binaları soğutmak için kullanılacak elektriğin azalması anlamına gelmektedir. Bunun sonucunda ise toplam enerjinin %20-30'una eşdeğer yıllık net enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Halilovic, 2017).

### 2.2.6. Titanyum dioksit teknolojisinin kullanıldığı yapı örnekleri

Titanyum dioksit, fotokatalitik özelliğinin sunduğu avantajlar sayesinde birçok yapıda ve yapı malzemelerinde farklı yöntemlerle kullanılmıştır. Bu yapılardan bazıları bulunduğu bölgelerdeki hava kirliliği üzerinde oluşturduğu etki sayesinde ön plana çıkmaktadır ve malzeme kullanımının teşviki için örnek konumunda bulunmaktadır.

### 2.2.6.1. Manuel Gea Gonzalez Hastanesi / Meksika

Hastane sahip olduğu tasarım ilkesi ile hava kirliliğini azaltan örnek bir mimari yapı olarak gösterilmektedir. Yapı, Meksika'nın başkenti ve nüfus bakımından da en kalabalık şehri olan Meksiko City'de yer almaktadır. Hastane ayrıca, şehrin güneyinde bulunan çok işlek bir cadde olan San Fernando'da konumlanmaktadır (Şekil 2.11). Meksiko City'de şehirdeki taşıtlardan ve endüstriyel yapılardan kaynaklı hava kirliliği oluşmaktadır. Kötü hava kalitesi ile sıklıkla gündeme gelen Meksiko City'de, hava kirliliğinden ötürü zaman zaman yetkili kurumlar tarafından tedbirler alınmaktadır. Bu tedbirlere örnek olarak; hava kirliliğinin aşırı düzeyde fazla olmasından dolayı 2019 yılında şehrin genelinde acil durum ilan edilmiş ve bazı araçların trafiğe çıkması yasaklanmıştır. Hava kirliliğine doğrudan etki eden bir sisteme sahip olan bu yapının, hava kirliliği ile sık sık gündeme gelen bir şehirde hayata geçirilmiş olması önem arz etmektedir.



Şekil 2.11. Hastanenin cadde üzerinden görünümü (CNN, 2015)

Sağlık Bakanlığı'nın finanse ettiği ve inşası yaklaşık 3 yıl süren bu yatırım, Meksika'daki sağlık altyapısını iyileştirmek için yapılmıştır. Toplam alanı yaklaşık olarak 35.000 m<sup>2</sup>'den oluşan yapının inşası Nisan 2013'te tamamlanmıştır. Yapının caddeye bakan cephesinin çoğunu saran ve organik formda birbirlerine bağlanan modüllere Prosolve370e adı verilmiştir. İçeriğinde bulunan Titanyum Dioksit sayesinde havanın temizlenmesine katkıda bulunan bu modüller cephede 100 metre boyunca uzanmaktadır ve yaklaşık olarak 2500 metrekarelik bir alanı kaplamaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Hastanenin cephesinde bulunan Prosolve370e Modülleri (Zva Architects)

Bilgisayar tabanlı “Rhino” programı kullanılarak tasarlanan bu modüller kendi içerisinde de farklılık göstermektedir (Şekil 2.13, 2.14). Cepheyi oluşturan her parçanın farklı ve birden fazla desene sahip olmasından dolayı havada bulunan kirli maddeler hemen hemen her yönden toplanabilmektedir. Bilgisayar ortamında çizimi yapılan, mekanik cihazlarla gerekli boyutlarda kesilen ve etrafı titanyum dioksit ile kaplanan bu modüllerin cepheye monte edilmesi ise oldukça kolay olmaktadır. Modüller başta cephe boyunca devam eden dikey çelik taşıyıcılara, bu dikey çelik taşıyıcılar yatay taşıyıcılara, yatay taşıyıcılar ise cephedeki yapı elemanlarına monte edilmiş ve sabitlenmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.13, 2.14. Prosolve370e Modüllerinin imalatı (Moafaq Al-Zaidi ve Sarkis Markaryan, 2020)



**Şekil 2.15.** Prosolve370e Modüllerinin çelik taşıyıcıyla olan bağlantısı (Iaac Blog, 2020)

Hastane üzerinde yapılan araştırmalar, cephenin içeriğinde bulunan titanyum dioksit sayesinde her gün yaklaşık olarak 8750 aracın ortaya çıkardığı hava kirliliğini azalttığını belirtmektedir (Castillo ve ark., 2022). Endüstriyellemenin sürekli olarak artması ve hava kalitesi seviyesinin kötü olması gibi durumlarla gündeme gelen ve zaman zaman acil durumların ilan edilip bazı araçların trafiğe çıkmasının yasaklandığı Meksiko City için günde yaklaşık olarak 8750 aracın neden olduğu hava kirliliğinin önüne geçilmesi önem arz etmektedir. Hastane sahip olduğu özelliği sayesinde hava kirliliği sorununa karşı duyarlı bir mimari tasarım anlayışının benimsendiğini göstermektedir. Bu ve benzeri projeler, çevresel sürdürülebilirlik ve sağlıklı yaşam alanlarına yönelik farkındalığı artırmak için önemli adımlardır.

#### **2.2.6.2. İtalyan Köşkü / İtalya**

İtalya'nın Milano şehrinde konumlanan ve "İtalyan Köşkü" olarak isimlendirilen bu eser, tasarım, teknoloji ve sürdürülebilirliğin birleştiği ve ortaya iyi sonuçlar çıkardığı düşünülen bir projedir. Projenin hayata geçiş süreci 2015 yılında düzenlenen küresel çaptaki bir mimari yarışmaya dayanmaktadır. Proje, düzenlenen bu yarışmada birincilik ödülü kazanmıştır. Tasarım ekibinden Nemesi, Proger ve BMS'nin mühendislik çalışmaları ile Prof. Livido De Santoli'nin sürdürülebilirlik alanında ortaya çıkardığı iş, projeye birincilik ödülünü kazandırmıştır.

İtalyan Köşkü adındaki bu proje, 6 kattan oluşan ve yaklaşık olarak 14.500 metrekare inşaat alanına sahip kalıcı bina olan İtalyan Sarayı ve 12.500 metrekare inşaat alanına sahip 2 katlı geçici binalardan oluşmaktadır. Yenilikçi tasarımı ile öne çıkan İtalyan Sarayı adlı asıl bina 35 metre yüksekliğindedir ve proje alanında bulunan en yüksek yapı konumundadır (Şekil 2.16). Tasarımında sürdürülebilirlik ilkelerinin görüldüğü bu bina, cephesinde kullanılan yenilikçi teknoloji ile üretilen malzeme ve tasarımındaki karmaşıklıktan dolayı zorlu bir mimari süreçten geçmiştir. Projenin sürdürülebilirliği, yapı çatısının bir kısmını kaplayan camda bulunan fotovoltaik ve cephedeki malzemede bulunan fotokatalitik özelliğe dayanmaktadır. Yapı cephesinde ağırlığı 2000 tonu bulan ve biodinamik çimento olarak adlandırılan titanyum dioksit içerikli plakalardan kullanılmıştır. Bu plakaları cepheye sabitlemek için ise yaklaşık 400 ton çelik kullanılmıştır.



Şekil 2.16. “İtalyan Sarayı” isimli kalıcı bina (Efcenet, 2015)

Projenin konsepti yapının cephesinde kullanılan malzeme formundan da anlaşılacağı gibi “Kent Ormanı” üzerine olmuştur (Moafaq Al-Zaidi ve Sarkis Markaryan, 2020). Mimarlar, cepheyi tasarlarken ağaç dallarında görüldüğü gibi karmaşık, iç içe ve benzersiz bir doku oluşturmuştur (Şekil 2.17). Ağaç dalına benzeyen bu cepheyi oluşturmak için içerisinde aktif titanyum dioksit bulunan 700’den fazla biodinamik çimento adlı plakalar kullanılmıştır. Cephe, yenilikçi malzemesi sayesinde gün içinde güneş ışığı ile temas ettiği takdirde tepkimeye girip havadaki kirliliği yakalayabilmektedir.



Şekil 2.17. Cephede malzeme ile oluşturulan “Kent Ormanı” Konsepti (WA, 2015)

Cephede kullanılan biodinamik çimento adlı plakalar plastik, çimento ve titanyum dioksit karışımı ile üretilmiştir. Cephedeki karmaşık tasarım ve tasarıma ait detaylar bilgisayar tabanlı modern programlar kullanılarak tasarlanmıştır ve sonrasında numaralı bölümlere ayrılarak hazır kalıplar oluşturulmuştur. Kalıplardan çıkan plakalar ise cephe boyunca kullanılan çelik taşıyıcılara sabitlenmiştir.

Yapının, tasarımı ve teknolojik özelliklerinin dışında sahip olduğu yenilikçi malzeme sayesinde günde 10.000 aracın oluşturduğu hava kirliliğini arıtma kabiliyetinden dolayı başarılı bir proje olduğu düşünülmektedir. Sürdürülebilirlik açısından alınan bu olumlu sonucun ardından mimarlar ve tasarımcılar, Milano'nun yaklaşık üçte birini aktif titanyum dioksit içerikli malzemeler ile kaplayacak bir proje üzerinde çalışmıştır. Elde edilen verilere göre kentte bulunan yapıların üçte birinin bu yenilikçi malzeme ile kaplanması, araç egzozlarından kaynaklanan hava kirliliğinin %60'nın önlenmesi anlamına gelmektedir.

Projesinde alınan başarılı sonuçlarla sürdürülebilir mimari anlayışa ilham olan yapının ardından İtalya'da çok sayıda şubesi olan ve titanyum dioksit teknolojisini benimseyen “SENINI” isimli büyük bir laboratuvar açılmıştır. Laboratuvarda üretilen çevre dostu malzemelere yakın çevredeki projelerden çok sayıda talep olmuştur.

### 2.3. Sıva ve Kullanım Alanları

Bu bölümde sıva tanımı, tarihçesi ve geçmişteki kullanımı, sıvalarda bulunması gereken özellikler ve yapıda kullanım yeri ve amacı ele alınmaktadır.

#### 2.3.1. Sıva tanımı

Sıva harcı, mimari yapılarda duvar gibi dik ve tavan gibi yatay yüzeyleri düzgünleştirmek, korumak ve bu yüzeylerdeki hata payını kapatmak için kullanılan bir çeşit harç olarak ifade edilebilmektedir (Babadağ, 2009). Bir başka tanımla ise sıvalar, yapıları oluşturan iç ve dış duvar yüzeylerine belirli bir kalınlıkta uygulanan, estetik amaçlı olarak daha düzgün yüzeyler elde etmek üzere kullanılabilen kaplamalardır (Uğur ve Güleç, 2016). Sıvalar çimento, kireç, alçı, sentetik ve benzeri bağlayıcılar, kum ve kırma taş gibi dolgu aracı olarak kullanılan agregalar ve su karışımından elde edilen ve yapı yüzeylerine mala ve püskürtme makinesi gibi araçlarla uygulanabilen yapı malzemeleridir (Dereli, 2004).

#### 2.3.2. Sıvanın tarihçesi ve geçmiş dönemlerde kullanımı

Yapılmış birçok arkeolojik çalışmalardan elde edilen verilere göre, geçmiş çağlarda yaşayan insanlar ağaç parçalarından inşa ettikleri ve konakladığı barınakları su ve toprak karışımıyla elde ettikleri çamurla kaplayıp atmosferik olayların etkilerinden ve zararlı hayvanlardan korunmaya çalışmışlardır. Yapılmış çalışmalarda ayrıca, insanların zamanla çamura kıyasla daha sağlam ve güzel görünümlü malzemeler kullandıkları da tespit edilmiştir. Mısır piramitlerinde ise 4000 yıl önce inşa edilmesine rağmen sertliğini ve dayanıklılığını koruyan sıvanmış yüzeyler tespit edilmiştir.

M.Ö. 3000-2000 yılları arasında, Anadolu'da inşa edilen yapılarda da duvar örülürken kullanılan sıva benzeri kaplama malzemeleri tespit edilmiştir. Bu malzeme üzerinde yapılan çalışmalarda karışım içerisinde yer yer saman ve elyaf varlığı tespit edilmiş, bunun ise zamanında malzeme yüzeyinde meydana gelen çatlamların önüne geçilmek için yapıldığı düşünülmektedir.

Kuzey Mezopotamya'da, Güney Doğu Anadolu bölgesinde yapılan çalışmalarda ise zamanında inşa edilen yapılarda kil ve saman karışımıyla elde edilen harcın yanı sıra, kireç katkılı sıvaların ve kil harçlarının da kullanıldığı tespit edilmiştir.

Çimento, sağladığı yüksek dayanım özelliği sayesinde 19. yüzyıldan itibaren sıva harçlarında bağlayıcı olarak kullanılmaya başlanmıştır. İnsanlar, sağladığı yüksek dayanım dışında malzemeye yüzeyinde çatlamalara sebep olduğu tespit edilen çimento sayesinde yeni arayışlara yönelmiş, alçı, kireç ve çimentonun kullanıldığı kompozit malzemeler üretmişlerdir.

20. yüzyılın ortalarından itibaren ise mineral bağlayıcı sıvalar ve sentetik sıvaların kullanımı yaygınlaşmıştır (Dereli, 2004).

### **2.3.3. Sıvanın yapıda kullanım yeri ve amacı**

Sıvalar, uygulandıkları yapı yüzeylerini estetik açıdan düzgün göstermeleri ve bu yüzeylerdeki kusurları örtmenin yanı sıra, yapı cephelerini atmosferik olaylardan koruma, iç ve dış mekân arasında ısı ve ses yalıtımı sağlama gibi fonksiyonlara da sahiptir. Sıvalar, yapıda kullanım alanlarına göre iç ve dış sıva olmak üzere sınıflandırılmaktadır. İç yüzeylerde uygulanan sıvalar, duvar hatlarını gizlemek ve daha düzgün yüzeyler elde etmenin yanı sıra, kir ve toz tutmayan dekoratif yüzeyler elde etmek amacıyla da uygulanmaktadır. Yapı duvarlarının dış tarafında kullanılan sıvalar ise atmosfer olaylarına maruz kalan dış cepheleri atmosferik etkilerden korumak, yapı bünyesine suyun nüfuz etmesini önlemek ve yapı karakterine uygun dış görünüm elde etmek amacıyla kullanılmaktadır (Babadağ, 2009).

### **2.3.4. Sıvada bulunması gereken özellikler**

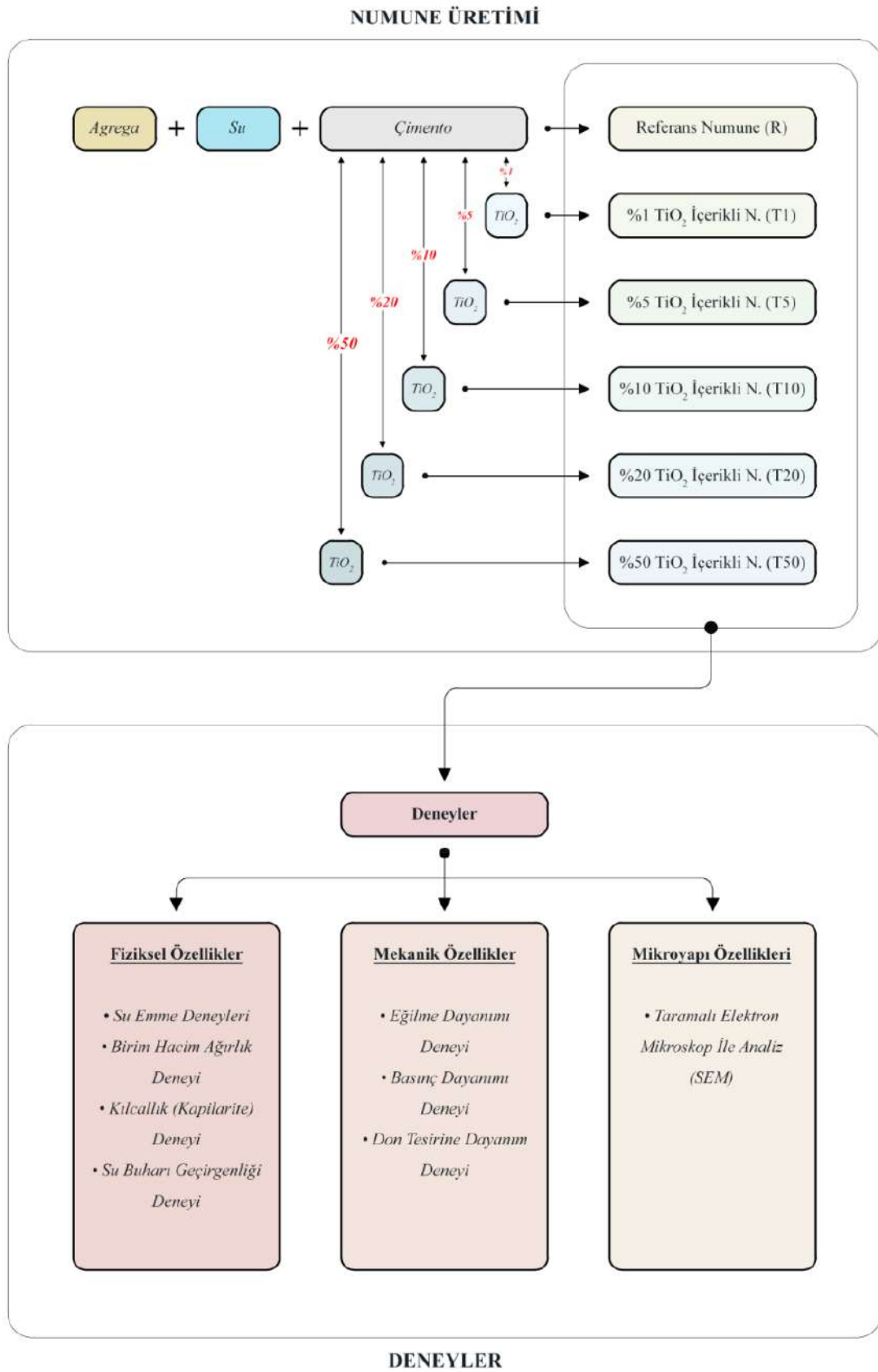
- Dış yüzeylere koruyucu katman görevi görmeli, atmosferik olaylardan kaynaklı olumsuz etkilerin önüne geçmelidir.
- Sıvalar küfe ve rutubete karşı dayanıklı olmalı, uzun süre fonksiyonunu devam ettirmelidir.
- Havadaki ısı değişiminden kaynaklı genişleme ve büzülme hareketleri minimum seviyede olmalı, bunun sonucunda meydana gelebilecek çatlakları kısıtlamalıdır.
- İhtiyacı karşılayacak kadar mukavemetli ancak hacim değişikliklerinde yüzeylerinde meydana gelen çatlakların önlenebileceği kadar elastik olmalıdır.
- Çoğunlukla gözeneksiz ancak duvarın hava ve nem alışverişini sağlayacak kadar gözenekli olmalıdır.
- Yüzeyleri bir miktar kaygan olmalı, yüzeye gelen suyu duvara nüfuz ettirmemeli ve kısa süre içerisinde kolayca aşınmamalıdır.

- Katmanlar arası sürtünme kuvveti fazla olmalı, yüzeyle yapışkanlığı (aderans) ve tutunma kabiliyeti iyi olmalı ve bu sayede yüzeyle yapışmalı ancak çok kalın ve sert olmamalıdır (Babadağ, 2009).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalarla hava kirliliğinin canlılar ve çevre üzerinde ciddi düzeyde tehdit oluşturduğu tespit edilmiş, gelecek nesillerin daha sağlıklı bir çevrede yaşamalarına olanak sağlamak için hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olacak yöntemlerin geliştirilmesine olan ihtiyaç belirtilmiştir. Bu çalışmaların yürütülebileceği sektörlerden birisi mimarlık olup, yapı cephelerinde içeriğinde TiO<sub>2</sub> nanopartikülleri bulunduran fotokatalitik özellikli malzemelerin kullanılmasıyla havadaki kirleticilere doğrudan müdahale edilebilmektedir. Ülkemizde, günümüzde inşa edilen betonarme yapıların birçoğunda cephe kaplamalarında sıva tercih edilmektedir. Sıvalar, örülen duvarları düzleştirmek ve kusurlarını örtmek için kullanılabilen gibi dekoratif amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, günümüz inşaat sektöründe sıklıkla kullanılan sıva malzemesinin karışımına titanyum dioksit eklenerek havadaki kirleticileri filtreleyebilen fotokatalitik özellikli alternatif cephe kaplama malzemesinin üretilmesi hedeflenmiştir. Malzeme karışımı mevcut standartlara uygun olarak hazırlanmalı, elde edilecek alternatif ürünün fiziksel ve mekanik özellikleri malzemenin yapılarda uygulanmasına olanak sağlamalıdır. Bu doğrultuda, TiO<sub>2</sub> içerikli optimum karışım oranının tespit edilebilmesi için deneysel metotların uygulanmasına ihtiyaç vardır. Çalışma kapsamında, şemada belirtilen materyal ve yöntemlerin kullanılmasıyla numuneler üretilmiş, elde edilen ürünler bir takım fiziksel, mekanik ve mikroyapı deneylerine tabi tutulmuş, sonuçlar kendi içlerinde kıyaslanmış ve optimum karışım oranı tespit edilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Materyal ve yöntem şeması

### 3.1. Materyal

Yürütülen deneysel çalışmalar kapsamında aşağıda özellikleriyle açıklanan malzemeler numune üretim aşamasında kullanılmıştır.

#### 3.1.1. Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>)

Titanyum dioksit yer yüzünde doğal olarak bulunan işlenmiş ve rafine edilmiş bir mineraldir. Maden olarak çıkarıldığında çoğunlukla siyah renktedir ancak işlendiğinde saf halde beyaz bir toza dönüşmektedir. Titania olarak da bilinen titanyum dioksit, TiO<sub>2</sub> kimyasal formülüne sahip bir titanyum geçiş metal oksitidir (Haider ve ark., 2019). Titanyum dioksit, fotokatalist olarak en etkili ve verimli yarı iletken malzemedir, iyi bir stabiliteye ve diğer malzemelere kıyasla yüksek ultraviyole emilimine sahiptir (Glassford ve Chelikowsky, 1992). Buna ek olarak, TiO<sub>2</sub> geniş kullanılabilirliği, biyouyumluluğu ve toksik olmaması nedeniyle çeşitli alanlardaki uygulamalar için ticari olarak temin edilebilen bir malzemedir (Jafari ve ark., 2020). TiO<sub>2</sub>, boyalarda, baskı mürekkeplerinde, plastiklerde, seramiklerde ve kozmetiklerde pigment olarak kullanılan beyaz bir renge sahiptir ve dünyada en geniş çapta kullanılan beyaz pigment olarak gösterilmektedir (Gázquez ve ark., 2014). TiO<sub>2</sub> ayrıca fotokatalizörler, kendi kendini temizleyen malzemeler ve güneş pilleri alanında kullanılacak elektronik ve optik özelliklere sahiptir. Titanyum dioksit, hidrojen üretimi, organik bileşiklerin bozunması, metal iyonlarının iyileştirilmesi ve organik bileşiklerin sentezi gibi fotokatalist olarak birçok uygulamaya sahiptir. TiO<sub>2</sub> üzerine yapılan araştırmaların çoğu fotokatalitik verimliliğini artırmak için gerçekleştirilmiştir (Eddy ve ark., 2023).

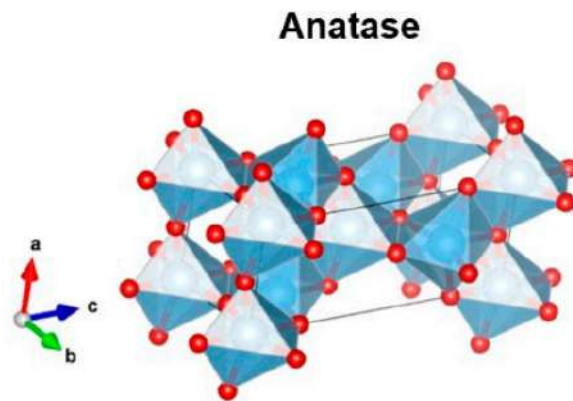
##### 3.1.1.1. TiO<sub>2</sub>'nin fazları

TiO<sub>2</sub> doğal olarak anatas, rutil ve brookit olmak üzere üç farklı kristal formda bulunmaktadır. Bu üç tip farklı bozulmalara sahip oktahedral TiO<sub>6</sub> olarak belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, TiO<sub>2</sub> (B) olarak adlandırılan başka bir polimorf daha vardır (Akakuru ve ark., 2020). Rutil kararlı bir faz iken, anatas ve brookit metastabil faz olarak gösterilmektedir. Buna ek olarak, brookit fazının sentezlenmesi zordur, bu nedenle üzerinde nadiren çalışılmaktadır (Kandiel ve ark., 2013). Bu polimorflar farklı özellikler ve sonuç olarak farklı fotokatalitik performanslar sergilemektedir. Fazlar arasındaki

fotokatalitik aktivite farkının nedeni hala tartışılıyor olmasına rağmen genel olarak birçok çalışma anatasa'nın en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olduğunu belirtmiştir (Akpan ve Hameed, 2009). Ancak bazı durumlarda rutil fotokatalizör olarak daha aktiftir. Buna ek olarak,  $\text{TiO}_2$  polimorflarının ikili karışımı birkaç reaksiyon için katalitik aktivite oranında önemli bir artış göstermiştir. Bu fazlar arasında, anatasa ve rutil ikili fazı en çok çalışılan faz olarak ortaya çıkmaktadır (Maver ve ark., 2021).

### A) Anatasa

Anatasa, titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) tetragonal kristal yapısına sahip metastabil bir mineral formudur (Şekil 3.2). Saf olduğunda renksiz veya beyaz olmasına rağmen, doğadaki anatasa genellikle safsızlıklardan dolayı siyah renktedir ve magmatik ve metamorfik kayalarda küçük konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Anatasa polimorfu, yukarıda da bahsedildiği üzere diğer  $\text{TiO}_2$  polimorflarına kıyasla daha iyi fotokatalitik aktivite göstermektedir. Anatasa, rutile kıyasla daha büyük bir bant aralığına sahiptir. Bu, oksitleme kabiliyetini artırır ve elektron transferini kolaylaştırır (Nosaka ve Nosaka, 2016). Anatasa'nın spesifik yüzey alanı çok daha geniş olduğundan aktif bölgeleri rutile kıyasla daha fazladır.

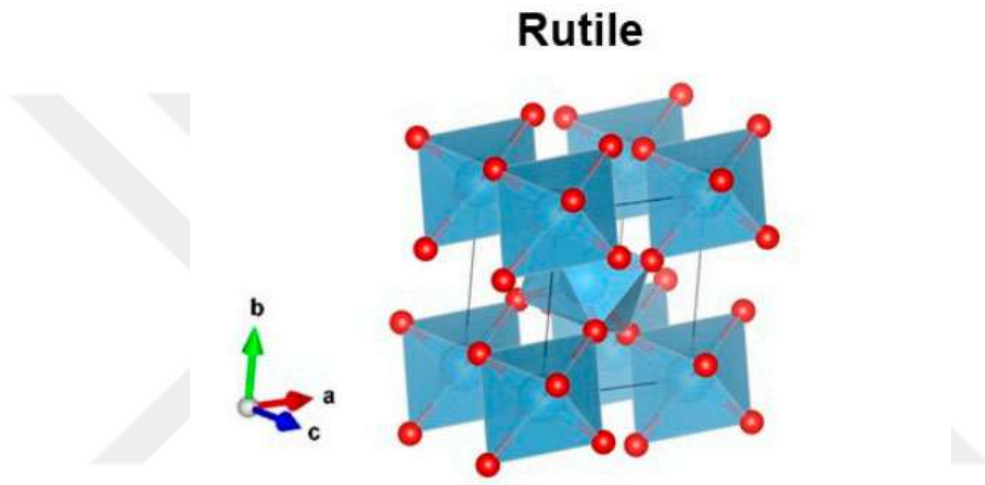


Şekil 3.2. Anatasa polimorfunun kristal yapısı (Eddy ve ark., 2023)

### B) Rutil

Rutil, yüksek sıcaklık ve basınçlı metamorfik ve magmatik kayalarda yaygın olarak görülen bir mineraldir. Adını Latince rutilus (kırmızı) kelimesinden alır ve bazı örneklerde geçirgen ışıkla bakıldığında gözlenen koyu kırmızı renge atıfta bulunmaktadır.

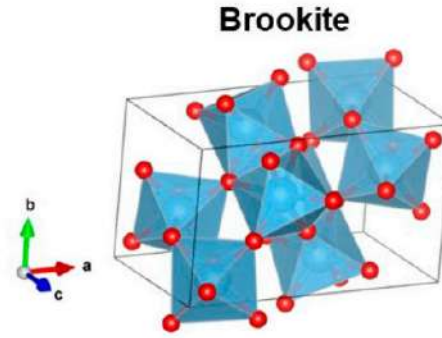
Kristal yapısı, anatase poliformuna benzemektedir ve tetragonal yapıdadır (Şekil 3.3). Termodinamik olarak rutil, tüm sıcaklıklarda en kararlı  $\text{TiO}_2$  polimorfudur. Rutil fazı, görünür bölgeye yakın UV ışığını absorbe edebildiği için fotokatalitik uygulamalar için çekici bir polimorf olsa da fotokatalitik aktivitesinin anatastan düşük olması sebebiyle fotokatalist olarak yaygın bir şekilde çalışılmamıştır. Rutilin bant aralığı 3,0 eV olup anatasekinden (3,2 eV) daha düşüktür. Düşük spesifik yüzey alanı, hızlı rekombinasyon ve minimum iletim bandının pozitif konumu, anatastan daha zayıf bir indirgeme kabiliyetine sahip olmasını sağlamaktadır (Eddy ve ark., 2023).



Şekil 3.3. Rutil polimorfunun kristal yapısı (Eddy ve ark., 2023)

### C) Brookit

Brookit, bilinen dört doğal polimorfik formda (aynı bileşime ancak farklı yapıya sahip mineraller) meydana gelen titanyum dioksitin ( $\text{TiO}_2$ ) ortorombik kristal yapısına sahip olan varyantıdır (Şekil 3.4). Brookit doğada genellikle kahverengi, bazense sarımsı, kırmızıya yakın kahverengi ve siyaha yakın renklerde bulunmaktadır. Brookit, anatase ve rutille kıyasla nadirdir ancak bu formlar gibi fotokatalitik aktivite sergilemektedir. Brookit ayrıca anatase veya rutilden daha büyük bir hücre hacmine sahiptir; birim hücre başına 8  $\text{TiO}_2$  grubu bulundururken anatase için bu sayı 4 ve rutil için 2'dir. Brookit poliformu, yaklaşık 750 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda rutil yapısına dönüşmektedir. Bu dönüşüm doğrudan rutille veya önce anatase oluşumu yoluyla gerçekleşebilmektedir. Bu, kristalit boyutu, boyut dağılımı ve kristalit temas alanı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Di Paola ve ark., 2013).



Şekil 3.4. Brookit polimorfunun kristal yapısı (Eddy ve ark., 2023)

### 3.1.1.2. Çalışmada kullanılan $\text{TiO}_2$ 'nin özellikleri

Çalışma kapsamında numunelerin içeriğine eklemek amacıyla anatas polimorfuna sahip nano boyuttaki titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) tercih edilmiştir (Şekil 3.5). Bunun sebebi, anatas polimorfunun tek fazlı olarak kullanıldığında diğer polimorflara kıyasla daha iyi fotokatalitik aktivite göstermesi ve bunu birçok çalışmada kanıtlamasıdır. Anatas  $\text{TiO}_2$  tozu Eskişehir Sanayisinden temin edilmiştir ve malzeme özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Formülü:  $\text{TiO}_2$

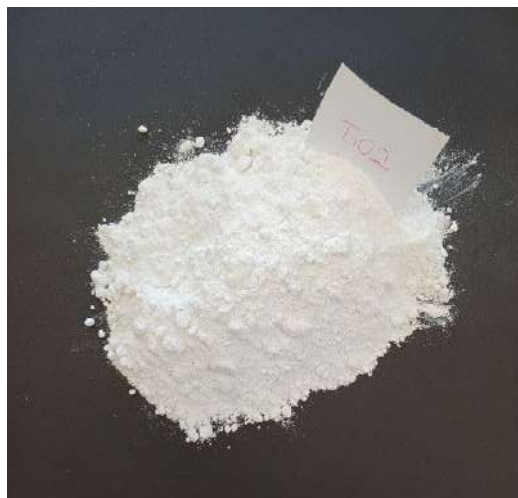
Molar Kütle: 76,866 g/mol

Yoğunluk: 4.23 g/cm<sup>3</sup>

Erime noktası: 1.843 C°

Kaynama Noktası: 2.972 C°

IUPAC Numarası: Titanium (IV) oxide



Şekil 3.5. Numunelerin üretiminde kullanılan  $\text{TiO}_2$  tozu

### 3.1.2. Çimento

Çimento, mineral parçacıklarını birbirine bağlayarak bir bütün hale getirebilen, yapıştırıcı ve bağlayıcı özelliği olan malzeme olarak tanımlanmaktadır. Su ile karıştırıldığında hidrasyon tepkimesi göstererek priz alan, sertleşen bir hamur haline gelen ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince bir şekilde öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır.

Çimento üretiminde kireçtaşı, mermer, silis, kil ve demir cevheri gibi hammaddeler kullanılmaktadır (Kapkaç, 2013). Hammadde ocaktan çıkarıldıktan sonra ilk olarak kırılıp öğütülür, belli oranlarda karıştırılarak sıcaklığı 1400-1500 °C'yi bulan fırınlarda pişirilerek klinker malzeme elde edilmektedir. Sonrasında klinker malzeme soğutulur ve stoklanır ve klinker alçıtaşı olarak bilinen başka bir doğal hammadde ile öğütülerek çimento elde edilmektedir (Yalçınkaya, 2024).

Günümüzde standartlara uygun bir şekilde üretilen her bir çimento “CEM Çimentosu” olarak adlandırılmaktadır. Bu çimentoların su ve agrega ile uygun bir şekilde karıştırıldığında belirlenmiş periyotlarda belirli dayanım seviyelerini kazanması, yeterli süre işlenebilirliğini muhafaza etmesi ve uzun süre hacim sabitliği göstermesi sebebiyle inşaat sektöründe beton ve sıva gibi harçların üretiminde kullanılmaktadır.

Piyasada farklı amaçlara yönelik CEM çimentosu çeşitleri bulunmaktadır. Çimentonun çeşitliliği, içeriğindeki bileşenlerin değişik oranlarda bulunması veya farklı yabancı bileşenler içermesi anlamına gelmektedir. Bu sayede kullanım yerlerindeki değişikliklere göre daha iyi performans gösteren çimento tipleri elde edilmektedir. Bileşimlerine göre beş ana tip CEM çimentosu vardır (Yeğinobalı ve Ertün, 2011). Bunlar;

- Portland Çimentosu (CEM I),
- Portland Kompoze Çimento (CEM II),
- Yüksek Fırın Cürüflü Çimento (CEM III),
- Puzolanik Çimento (CEM IV),
- Kompoze Çimento (CEM V).

Ana bileşenler ve minör ilave bileşenlerle beraber toplam 27 çeşit CEM çimentosu üretimi yapılmaktadır.

### 3.1.2.1. Çalışmada kullanılan çimentonun özellikleri

Sıva üretiminde genellikle “Portland Çimentosu” olarak adlandırılan malzemenin kullanıldığı bilinmektedir. Fotokatalitik çalışmalarda ise, beyaz portland çimentonun tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi, geleneksel gri çimento kullanılarak üretilen numunelerin yüzeylerinde kirlerin parçalanması sonucu beyaz lekelenmelerin oluşmasıdır (Acar, 2022). Ayrıca beyaz portland çimento kullanımının bir diğer avantajı ise; sıvanın yapıda uygulanmasının ardından üzerinin herhangi bir beyaz boya ile kaplanmasına gerek kalmamaktadır. Bundan yola çıkarak, çalışmada kullanmak amacıyla “Beyaz Portland Çimento” adıyla Mersin Çimento Fabrikasında üretimi yapılan malzeme temin edilmiştir (Şekil 3.6). Ürüne ait özellikler aşağıda belirtilmiştir.

002 – C010

TS 21:2015

Beyaz Portland Çimento (BPC)

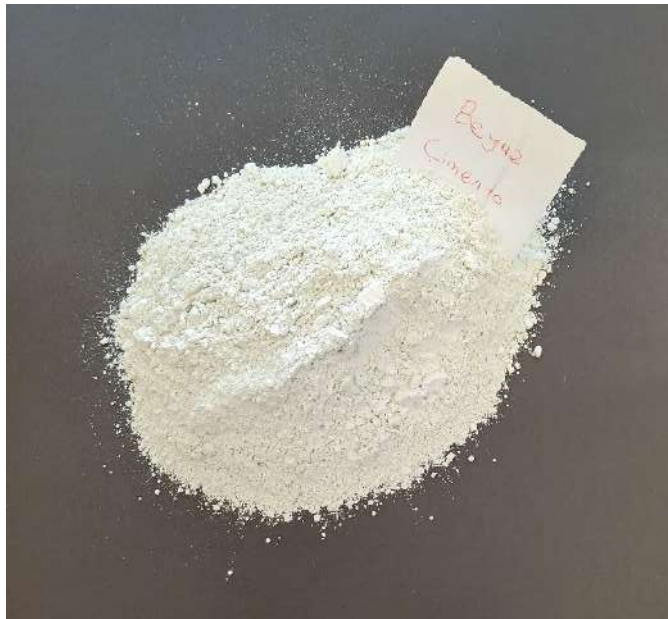
Basınç Dayanım Sınıfı: 52,5

Erken Dayanım Sınıfı: R (Yüksek)

Beyazlık: 85

Sistem 1+

Performans Beyanname Numarası: 2016-8



Şekil 3.6. Numunelerin üretiminde kullanılan beyaz portland çimentosu

### 3.1.3. Agregalar

Agregalar, beton ve sıva benzeri harçların üretiminde çimento ve suyla beraber kullanılan, içeriğinde farklı boyutlarda tane bulunduran mineral yapıları inorganik malzeme olarak tanımlanmaktadır. Agregalar, içeriğine katıldığı harçlı sistem hacminin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır (Usta, 2012). Temin fiyatının ucuz olmasından dolayı karışımın maliyetini düşürmektedir. Harç üretiminde karışıma ilave edilen çimento zamanla kuruyarak büzülme etkisi gösteren bir malzemedir. Agregalar, karışım içerisinde büzülmeden kaynaklı oluşabilecek hacim değişikliğini engellemekte, bu sayede malzeme yüzeyinde meydana gelen çatlakları minimuma indirmektedir. Farklı boyutlarda tane içermesinden dolayı dayanıklı ve sert malzemedir, bu sayede karışımın dayanımının yüksek olmasına katkıda bulunmaktadır (Yalçınkaya, 2024). Agregalar üretim şekilleri, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

Kaynaklarına göre doğal ve yapay olarak sınıflandırılan agregalar çeşitleri mevcuttur. Doğal agregalar, göl kenarları, nehir yatakları ve taş ocaklarından elde edilen, üzerlerinde kırma ve yıkama dışında herhangi bir işlem yapılmamış olan agregalardır. Yapay agregalar ise dekoratif amaçlı olarak veya özellikleri belirlenerek çıkarılan agregalardır.

Agregalar, birim ve özgül ağırlıklarına göre ağır, normal ve hafif agregalar olarak sınıflandırılmaktadır. Ağır agregalar, "TS EN 1097-6" standardına uygun şekilde üretilmiş, etüv kurusu tane birim hacim kütlesi en az 3000 kg/m<sup>3</sup> olan agregalardır. Normal agregalar, aynı standart doğrultusunda üretilen ve etüv kurusu tane birim hacim kütlesi 2000 kg/m<sup>3</sup> - 3000 kg/m<sup>3</sup> arasında olan agregalardır. Hafif agregalar ise etüv kurusu tane birim hacim kütlesi 2000 kg/m<sup>3</sup>'ten küçük olacak şekilde "TS EN 1097-6" standardı doğrultusunda üretilen agregalardır.

Tane büyüklüğüne göre ince ve iri olmak üzere iki farklı agregalar çeşidi mevcuttur. İri agregalar 4 milimetrelik kare gözlü elek üzerinde kalan agregalar olarak, ince agregalar ise 4 milimetrelik kare gözlü elek üzerinden geçen agregalar olarak sınıflandırılmaktadır.

Agregalar tane şekillerine göre köşeli, yuvarlak, yassı ve uzun olarak sınıflandırılmaktadır. Agregalardaki tane şekilleri karışımda kullanılan çimento miktarını etkilemektedir. İçeriğinde yassı ve uzun tanecikler bulunduran agregalarda, tanelerin yüzeyinin hacmine oranının oldukça büyük olması agregalar taneciklerinin yüzeyini kaplamak için daha fazla çimentoya ihtiyaç duyulması anlamına gelmektedir. Yuvarlak

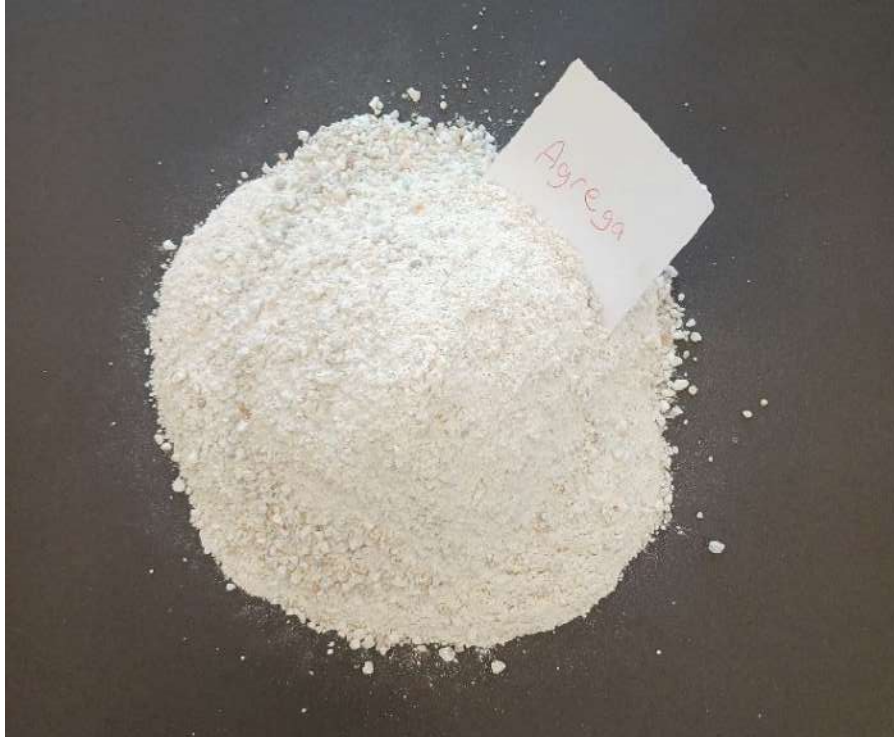
veya kübik taneciklere sahip agregalar ise karışımda kullanıldığında daha az çimento gerektirmektedir.

Kimyasal özelliklerine göre reaktif ve reaktif olmayan olmak üzere iki farklı agrega tipi mevcuttur. Agregalarda reaktiflik, mineral yapısının türü ve formuyla ilişkilidir. Kristal yapıda bulunan silika mineralleri genelde stabildir ve reaktif değildir. Amorf yapıda olan mineraller ise reaktif özellik göstermektedir.

Piyasada beton ve sıva gibi harçların üretiminde kullanılan çeşitli agregalar mevcuttur. Bunlar; kum, çakıl, kırma taş, yüksek fırın cürufu, pişmiş kil, bims, geliştirilmiş perlit ve uçucu kül agregalarıdır.

### 3.1.3.1. Çalışmada kullanılan agreganın özellikleri

“Kırma Taş Agregası” olarak bilinen agrega türünün geleneksel yöntemle yapılan dış cephe sıva harçlarında yaygın kullanım alanı sağladığı bilinmektedir. Bu nedenle bölgede yaygın olarak kullanılan agrega türü, Konya İli, Selçuklu İlçesi, Karaömerler Mahallesinde 38°05'25"Kuzey, 32°42'44"Doğu koordinatları arasında yer alan özel bir işletmeden (Darbazlar Kum Ocağı) kırma taştan sıva kumu olarak hazırlanan kısımdan temin edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Numunelerin üretiminde kullanılan kırma taş agregası

### 3.1.4. Su

Su, beton ve sıva gibi içeriğini kum, çakıl, taş ve benzeri malzemelerin oluşturduğu karışımların karıştırılması ve uygulanması için gereklidir. Malzeme içeriğine ilave edilerek karışımın kıvama gelmesini, homojenik bir şekilde karışmasını ve prizini alarak sertleşmesini sağlamaktadır.

Numunelerinin üretim aşamasında kullanılacak suyun temiz olduğuna dikkat edilmelidir. İçeriğinde yapısına zarar verecek organik yağlar ve endüstriyel atıklar bulunmamalı, zararlı maddelerden arındırılmış olmalıdır. Ph değeri 7'den büyük olmalı, asit özelliği taşımamalıdır (Dereli, 2004).

## 3.2. Yöntem

Yürütülen deneysel çalışmalar kapsamında aşağıda belirtilen yöntemler uygulanmıştır.

### 3.2.1. Ön deneyler

Ön deneyler kapsamında fotokatalitik özellikli sıva üretiminde kullanılacak olan agrega kumunun granülometri eğrisi ortaya çıkarılmıştır. Bu işlemin amacı, karışıma dahil edilecek agrega kumunun tane boyutlarını ve dağılımını tespit etmektir. Beton ve sıva gibi karışımlarda kullanılan agregaların granülometreleri, “ideal granülometri eğrileri” ile uyuşmalıdır. Bu eğrinin belirlenmesi için elek analizi deneyi yapılmaktadır. Bu doğrultuda, “Materyal” bölümünde açıklanan ve temini yapılan agrega kumunun 600 gramlık örnek numunesi “TS EN 933-1” standardı kapsamında üst üste bulunan ve sırasıyla 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 milimetre boşluklara sahip elek sisteminden geçirilmiştir (Şekil 3.8, 3.9). Elek üzerinde kalan tanelerin gramajları ve agreganın granülometri eğrisi tablolar ve grafiklerle aktarılmıştır.



Şekil 3.8. Elek sistemi



a. 4 mm elek üstü



b. 2 mm elek üstü



c. 1 mm elek üstü



d. 0.5 mm elek üstü



e. 0.25 mm elek üstü



f. 0.125 mm elek üstü



g. 0.063 mm elek üstü

Şekil 3.9. Elek üstünde kalan agrega taneleri

600 gramlık örnek agrega kumunun elek sisteminden geçirilmesinin ardından elek üstünde kalan miktarlar hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Tartım esnasında tanelerin konulduğu kâsenin darası alınmıştır. Elek üstünde kalan tane ağırlıkları ve yığışımı ağırlık Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 3.1.** Agrega kumunun tane dağılımı

Elek no (mm)	Elek üstünde kalan ağırlık (g)	Elek üstünde kalan yığışımı ağırlık (g)
4	<b>14,6</b>	<b>14,6</b>
2	<b>140,7</b>	14,6 + 140,7 = <b>155,3</b>
1	<b>126,4</b>	155,3 + 126,4 = <b>281,7</b>
0.5	<b>89,7</b>	281,7 + 89,7 = <b>371,4</b>
0.25	<b>77,9</b>	371,4 + 77,9 = <b>449,3</b>
0.125	<b>70</b>	449,3 + 70 = <b>519,3</b>
0.063	<b>54,7</b>	519,3 + 54,7 = <b>574</b>
Elek altı	<b>26</b>	574 + 26 = <b>600</b>

Elek üstlerinde kalan yığışımı ağırlıkların yüzdesel oranları Tablo 3.2’de hesaplanmıştır.

**Tablo 3.2.** Elek üstünde kalan yığışımı ağırlıklarının yüzdesel olarak hesabı

Elek no (mm)	Elek üstünde kalan ağırlık (g)	Elek üstünde kalan yığışımı ağırlık (g)	Elek üstünde kalan yığışımı ağırlık (%)
4	<b>14,6</b>	<b>14,6</b>	$(14,6/600) \times 100 =$ <b>2.4</b>
2	<b>140,7</b>	<b>155,3</b>	$(155,3/600) \times 100 =$ <b>25.9</b>
1	<b>126,4</b>	<b>281,7</b>	$(281,7/600) \times 100 =$ <b>47</b>
0.5	<b>89,7</b>	<b>371,4</b>	$(371,4/600) \times 100 =$ <b>61.9</b>
0.25	<b>77,9</b>	<b>449,3</b>	$(449,3/600) \times 100 =$ <b>74.9</b>
0.125	<b>70</b>	<b>519,3</b>	$(519,3/600) \times 100 =$ <b>86.6</b>
0.063	<b>54,7</b>	<b>574</b>	$(574/600) \times 100 =$ <b>95.7</b>
Elek altı	<b>26</b>	<b>600</b>	$(600/600) \times 100 =$ <b>100</b>

Elek üstlerinde kalan yığışımı ağırlıkların yüzdesel oranları kullanılarak eleklerden geçen yığışımı ağırlıkların yüzdesel oranları hesaplanmış ve Tablo 3.3’te gösterilmiştir.

**Tablo 3.3.** Elekten geçen yığışımli ağırlıkların yüzdesel olarak hesabı

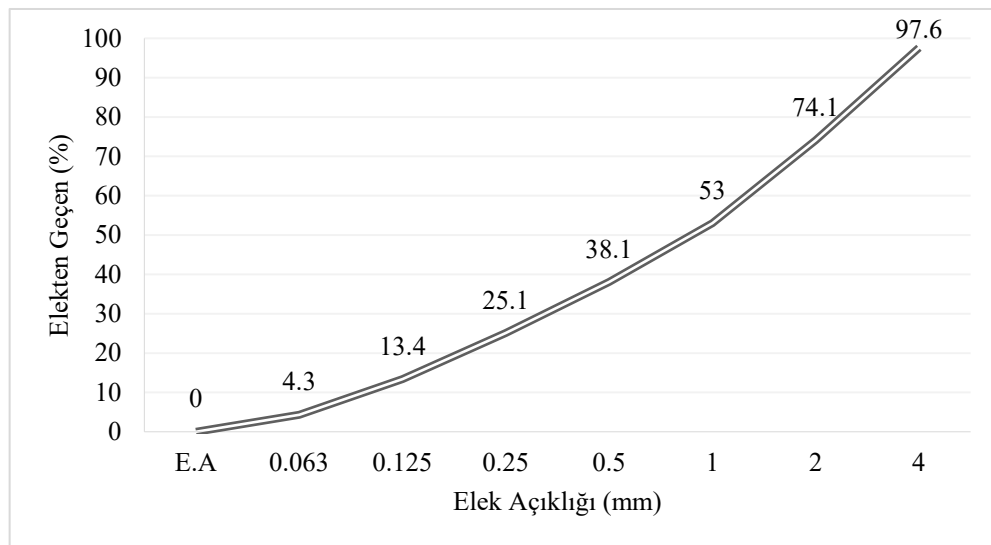
Elek no (mm)	Elek üstünde kalan ağırlık (g)	Elek üstünde kalan yığışımli ağırlık (g)	Elek üstünde kalan yığışımli ağırlık (%)	Elekten geçen yığışımli ağırlık (%)
4	14,6	14,6	2,4	100 - 2,4 = 97,6
2	140,7	155,3	25,9	100 - 25,9 = 74,1
1	126,4	281,7	47	100 - 47 = 53
0,5	89,7	371,4	61,9	100 - 61,9 = 38,1
0,25	77,9	449,3	74,9	100 - 74,9 = 25,1
0,125	70	519,3	86,6	100 - 86,6 = 13,4
0,063	54,7	574	95,7	100 - 95,7 = 4,3
Elek altı	26	600	100	100 - 100 = 0

Grafik çizimi için gerekli olan elek göz açıklıkları ve elekten geçen miktarların yüzdesel oranları Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.4.** Elek göz açıklıkları ve eleklerden geçen yığışımli ağırlıkların yüzdesi

Elek no (mm)	Elekten geçen yığışımli ağırlık (%)
4	97,6
2	74,1
1	53
0,5	38,1
0,25	25,1
0,125	13,4
0,063	4,3
Elek altı	0

Elek göz açıklıkları ve eleklerden geçen yığışımli ağırlıkların yüzdesel verilerinin kullanılmasıyla oluşturulan grafik ve granülometri eğrisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

**Şekil 3.10.** Agrega kumunun granülometri eğrisi

Agrega kumunun tane boyutları ve dağılımının tespit edilmesi amacıyla yapılan elek analizi deneyi sonucunda elde edilen granülometri eğrisinin “iç bükey” şeklinde olması, agreganın sıva numuneleri üretiminde kullanılmaya elverişli olduğunu göstermektedir. Elde edilen granülometri eğrisinin “dış bükey” ve benzeri bir şekilde ortaya çıkması, agrega tanelerinin olması gerektiğinden daha küçük olduğunu ve bunun sonucu olarak da karışımın dayanımını düşüreceğini göstermektedir. Böyle bir durumda karışıma daha iri taneli agregaların eklenmesi gerekmektedir.

### 3.2.2. Numunelerin üretilmesi

Numuneler “TS 1481” standardında belirlenen malzeme karışım oranlarına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalara tabi tutmak amacıyla içeriğinde %1, %5, %10, %20 ve %50 oranlarında titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) bulunan numunelerin yanında, elde edilen sonuçların mevcut malzeme ile karşılaştırılmasının yapılabilmesi için karışımına  $TiO_2$  eklenmeyen referans numunelerde üretilmiştir. Çalışmalar kapsamında 6 farklı numune tipi için toplam 66 adet sıva numunesi üretilmiştir. Bu numunelerden 24 tanesinin fiziksel deneylerde, 42 tanesinin ise mekanik deneylerde kullanılması planlanmıştır. 54 adet numune, 4x4x16 cm ölçülerinde dikdörtgen prizması şeklinde 3 adet yuvası bulunan metal kalıp kullanılarak, 12 adet numune ise yaklaşık 80x10 mm ölçülerinde yuvarlak yuvası bulunan silikon kalıp kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.11). Titanyum dioksit nanopartiküllerinin karışımlara eklenmesi, belirlenen oranlarda çimento ile ağırlıkça yer değiştirmesiyle yapılmıştır. Bu doğrultuda agrega, çimento, titanyum dioksit tozu ve su uygun oranlarda plastik kap kullanılarak karıştırılmıştır. Gerekli kıvamı sağlanan numuneler kalıplara yerleştirilmeden önce yuvalar yağlanmıştır. Bu işlemin amacı, prizini alan numunelerin yuvalardan kolayca çıkarılmasına olanak sağlamaktır. Yuvaların yağlanmasının ardından ıspatula kullanılarak numunelerin tam olarak yerleşmesi sağlanmış ve aralarda boşluk kalmaması için titreşim uygulaması yapılmıştır. İstenilen yerleşimi sağlanan numuneler prizini alabilmesi için içi hava dolu poşet içerisinde 1-2 gün bekletilmiştir (Şekil 3.12). Poşetlerden çıkarılan numuneler ise su havuzuna yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Aynı prosedür tüm numunelere uygulanmıştır. Üretimi tamamlanan numuneler bir takım fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur.



a. Metal kalıp



b. Silikon kalıp

Şekil 3.11. Numune üretiminde kullanılan kalıplar



a. Karışımın hazırlanması



b. Karıştırılması



c. Kalıba yerleştirilmesi



d. İçi hava dolu poşette bekletilmesi

Şekil 3.12. Numune üretiminde uygulanan adımlar



Şekil 3.13. Numunelerin su havuzunda bekletilmesi

“TS 1481” standardında belirtilen malzeme ve kullanım miktarları Tablo 3.5’te gösterilmektedir.

Tablo 3.5. “TS 1481” standardında belirtilen malzemeler ve kullanım miktarları

Malzeme	TS 1481’e göre gerekli karışım miktarları
Agrega	1m <sup>3</sup> / 1000 kg
Çimento	350 – 500 kg
Su	140 – 170 lt/kg

Yaklaşık 600 gram ağırlığındaki referans numunenin üretimi için gerekli olan karışım “TS 1481” standardında belirtilen miktarların oranlanmasıyla hesaplanmış ve Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Referans numunelerinin üretiminde kullanılan karışım miktarları

Referans numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler	1 adet numune için gerekli karışım miktarları	3 adet numune için gerekli karışım miktarları
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	140 – 200 g	420 – 600 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

Yaklaşık 600 gram ağırlığında olan ve içeriğine %1 oranında titanyum dioksit eklenen numunelerin üretimi için gerekli olan karışım miktarları titanyum dioksit ile çimentonun ağırlıkça yer değiştirmesi yöntemiyle hesaplanmış ve Tablo 3.7’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.7.** İçeriğine %1 oranında TiO<sub>2</sub> katılan numunelerin üretiminde kullanılan karışım miktarları

<b>%1 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler</b>	<b>1 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>	<b>3 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	138,6 – 198 g	416,8 – 594 g
TiO <sub>2</sub>	1,4 – 2 g	4,2 – 6 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

Yaklaşık 600 gram ağırlığında olan ve içeriğine %5 oranında titanyum dioksit eklenen numunelerin üretimi için gerekli olan karışım miktarları titanyum dioksit ile çimentonun ağırlıkça yer değiştirmesi yöntemiyle hesaplanmış ve Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.8.** İçeriğine %5 oranında TiO<sub>2</sub> katılan numunelerin üretiminde kullanılan karışım miktarları

<b>%5 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler</b>	<b>1 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>	<b>3 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	133 – 190 g	399 – 570 g
TiO <sub>2</sub>	7 – 10 g	21 – 30 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

Yaklaşık 600 gram ağırlığında olan ve içeriğine %10 oranında titanyum dioksit eklenen numunelerin üretimi için gerekli olan karışım miktarları titanyum dioksit ile çimentonun ağırlıkça yer değiştirmesi yöntemiyle hesaplanmış ve Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

**Tablo 3.9.** İçeriğine %10 oranında TiO<sub>2</sub> katılan numunelerin üretiminde kullanılan karışım miktarları

<b>%10 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler</b>	<b>1 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>	<b>3 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	126 – 180 g	378 – 540 g
TiO <sub>2</sub>	14 – 20 g	42 – 60 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

Yaklaşık 600 gram ağırlığında olan ve içeriğine %20 oranında titanyum dioksit eklenen numunelerin üretimi için gerekli olan karışım miktarları titanyum dioksit ile çimentonun ağırlıkça yer değiştirmesi yöntemiyle hesaplanmış ve Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

**Tablo 3.10.** İçeriğine %20 oranında TiO<sub>2</sub> katılan numunelerin üretiminde kullanılan karışım miktarları

<b>%20 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler</b>	<b>1 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>	<b>3 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	112 – 160 g	336 – 480 g
TiO <sub>2</sub>	28 – 40 g	84 – 120 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

Yaklaşık 600 gram ağırlığında olan ve içeriğine %50 oranında titanyum dioksit eklenen numunelerin üretimi için gerekli olan karışım miktarları titanyum dioksit ile çimentonun ağırlıkça yer değiştirmesi yöntemiyle hesaplanmış ve Tablo 3.11’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.11.** İçeriğine %50 oranında TiO<sub>2</sub> katılan numunelerin üretiminde kullanılan karışım miktarları

<b>%50 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler</b>	<b>1 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>	<b>3 adet numune için gerekli karışım miktarları</b>
Agrega	400 g	1200 g
Çimento	70 – 100 g	210 – 300 g
TiO <sub>2</sub>	70 – 100 g	210 – 300 g
Su	56 ml/g – 68 ml/g	168 ml/g – 204 ml/g

### 3.2.3. Fiziksel özellikler

Üretilen numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için yapılan su emme, birim hacim ağırlık, kılcılık ve su buharı geçirgenliği deneylerinin yöntemleri bu başlık altında ele alınmıştır.

#### 3.2.3.1. Su emme deneyleri

Su emme deneyleri, kütlece ve hacimce su emme deneyi olarak iki başlıkta ele alınmıştır.

##### A) Kütlece su emme deneyi

Deney “TS 699” standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Uygulamaya geçilmeden önce deneye tabi tutulacak numune yüzeylerinin yeterince temiz olduğuna dikkat edilmiştir. Numune üretim aşamasında ürünleri kalıplardan kolayca çıkarabilmek

amacıyla yuvalar yağlanmıştı. Bu yağların bir kısmı prizini alan numunelerin yüzeylerinde gözlemlenmiştir. Bu durum numune yüzeylerindeki gözeneklerin kapanmasına ve buna bağlı olarak ürünlerin suya doygun hale gelmesinin önüne geçecektir. Uygulanacak deney sonucunda daha doğru veriler elde etmek amacıyla numune yüzeylerinde biriken yağ parçacıkları yumuşak uçlu fırça kullanılarak temizlenmiştir.

Yüzeyleri temizlenen numuneleri suya doygun hale getirmek amacıyla havuza numune yüksekliğinin 1/4'ü (~4 cm) kadar su eklenmiştir. Numuneler bu şekilde yaklaşık 1 saat su içerisinde tutulmuştur. Sonrasında aynı işlem tekrarlanmış, havuzdaki su numune yüksekliğinin yarısına (~8 cm) gelene kadar arttırılmış ve ürünler yaklaşık 1 saat daha bekletilmiştir. 1 saatin ardından havuzdaki su yüksekliği numune yüksekliğinin 3/4'üne (~12 cm) çıkartılmış ve 1 saat daha beklenmiştir. Daha sonra havuza numune yüksekliğini aşacak şekilde (>16 cm) su ilave edilmiş, ürünler bu şekilde yaklaşık 2 gün daha su içerisinde bekletilerek suya doygun hale getirilmiştir. 2 günün sonunda numuneler su havuzundan çıkartılmış ve kuru bez kullanılarak yüzeylerindeki su damlacıkları giderilmiştir. Suyu doygun haldeki numuneler bekletilmeden hassas terazi kullanılarak tartılmış ve elde edilen veriler kaydedilmiştir. Bu işlemin ardından numuneler başta etüv kullanılarak sonrasında oda sıcaklığında bekletilerek değişmez kütleyle gelene kadar kurutulmuş ve bünyesindeki suyun tamamen giderilmesi sağlanmıştır. Kuru haldeki numuneler de hassas terazi kullanılarak tartılmış ve veriler kaydedilmiştir (Şekil 3.14). Deney "A" ve "B" olarak gruplandırılan toplam 12 adet numune üzerinde uygulanmıştır.



a. R (A) kuru ağırlığı



b. T1 (B) kuru ağırlığı



c. T5 (A) kuru ağırlığı



d. T10 (B) kuru ağırlığı

e. T20 (A) kuru ağırlığı

f. T50 (B) kuru ağırlığı

**Şekil 3.14.** Bir grup kuru numunenin tartım işlemi

Kütlece su emme oranı aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.12).

**Tablo 3.12.** Kütlece su emme formülü (TS 699)

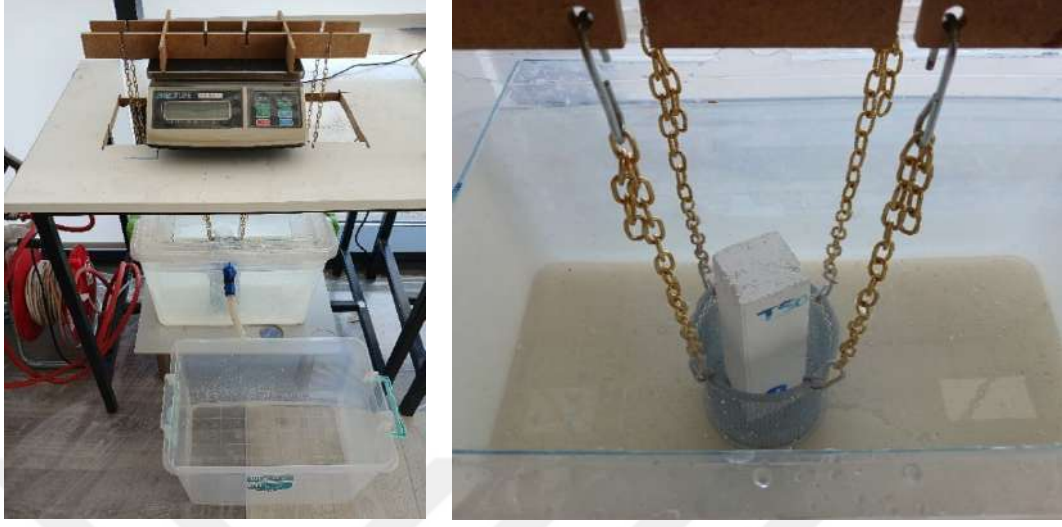
$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} \cdot 100$	<i>S<sub>k</sub>; kütlece su emme oranı (%)</i>
	<i>G<sub>d</sub>; suya doymun malzeme ağırlığı (g)</i>
	<i>G<sub>k</sub>; kuru malzeme ağırlığı (g)</i>

12 adet numunenin deneye tabi tutulmasıyla elde edilen ağırlık verileri formül üzerinde kullanılmış ve numunelere ait “Kütlece su emme oranları” yüzdeler olarak tespit edilmiştir. Oranlar, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Su emme deneyleri” başlığı altında paylaşılmıştır.

## B) Hacimce su emme deneyi

Deney “TS 699” standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Hacimce su emme oranının belirlenebilmesi için kuru ve suya doymun numune ağırlıklarının yanında doymun haldeki numunelerin su içindeki kütlelerinin de tespit edilmesi gerekmektedir. Numunelerin su içindeki kütlelerini belirlemek için “Arşimet Terazisi” kullanılmıştır. Kaptaki su yüksekliği seviye deliği ile aynı hizada olacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler, su içinde dengede bulunan ve hassas teraziye bağlanmış sepete yüzeylerinin tamamı su içerisinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Sepete yerleştirilen her bir numune seviye deliğinden suyun taşmasına sebep olmuştur. Taşan suyun kesilmesiyle hassas terazide ölçülen değerler numunelerin su içindeki ağırlıklarını belirtmektedir (Şekil 3.15).

Aynı prosedür “A” ve “B” olarak gruplandırılan toplam 12 adet numuneye uygulanmış ve her ölçümden önce kaptaki su yüksekliği seviye deliği ile aynı hizaya getirilmiştir.



Şekil 3.15. Hacimce su emme deneyinin uygulanması

Hacimce su emme oranı aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.13).

Tablo 3.13. Hacimce su emme formülü (TS 699)

$S_h = \frac{G_d - G_k}{G_k - G_{ds}} \cdot 100$	<i>S<sub>h</sub>; hacimce su emme oranı (%)</i>
	<i>G<sub>d</sub>; suya doymuş malzeme ağırlığı (g)</i>
	<i>G<sub>k</sub>; kuru malzeme ağırlığı (g)</i>
	<i>G<sub>ds</sub>; suya doymuş malzemelerin su içindeki ağırlığı (g)</i>

Tartım işlemi sonucu elde edilen veriler formül üzerinde kullanılmış ve numunelere ait “Hacimce su emme oranları” yüzdeler olarak tespit edilmiştir. Oranlar, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Su emme deneyleri” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.3.2. Birim hacim ağırlık deneyi

Deney “TS 699” standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneye metal kalıp kullanılarak üretilen prizma şeklindeki toplam 12 adet numune tabii tutulmuştur. Birim hacim ağırlık değerinin hesaplanması amacıyla kuru numunelerin ağırlıkları ve hacimleri

tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değeri aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.14).

**Tablo 3.14.** Birim hacim ağırlık değeri formülü (TS 699)

$d_h = \frac{G_k}{V}$	$d_h$ ; birim hacim kütlesi (g/cm <sup>3</sup> )
	$G_k$ ; kuru malzeme ağırlığı (g)
	$V$ ; numune hacmi (cm <sup>3</sup> )

12 adet kuru numunenin ağırlık (g) ve hacim (cm<sup>3</sup>) verileri formül üzerinde kullanılmış ve numunelerin “Birim hacim ağırlık değerleri” tespit edilmiştir. Elde edilen değerler, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Birim hacim ağırlık deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.3.3. Kılcallık (Kapilarite) deneyi

Deney “TS EN 1015-18” standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Standartta deneyin ilkesi; “*Kapiler etkiye bağlı su emme katsayısı, atmosferik basınçta öngörülen koşullar altında harç prizma numuneleri kullanılarak ölçülür. Sabit kütlede kadar kurutulduktan sonra, numunenin bir yüzü belirli bir süre boyunca 5 ila 10 mm suya daldırılır ve kütledeki artış belirlenir*” olarak açıklanmaktadır. Bundan yola çıkarak deney kapsamında prizma şeklindeki toplam 6 adet numune kullanılmıştır. Numuneler ilk başta 105°C’lik etüvde, sonrasında oda sıcaklığında bekletilerek değişmez kütleyle gelene dek kurutulmuştur. Kuru numunelerin ağırlıkları hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. İşlem süresi boyunca su emiliminin sadece bir yüzeyden gerçekleşmesini sağlamak amacıyla numunelerin yan yüzeylerine kâğıt bant ve parafin uygulaması yapılmıştır. Parafinin kurumasının ardından numuneler deney için hazırlanan tepsinin içerisine dik bir şekilde yerleştirilmiş ve süreç başlatılmıştır. Deney süresi boyunca tepsi içerisindeki su yüksekliğinin parafin hizasında (~5-10 mm) olmasına dikkat edilmiştir. Zamanla emilimin gerçekleşmesiyle tepside azalan suya takviye yapılmıştır. Ağırlık ölçümleri 10. ve 90. Dakikada olmak üzere 2 kez gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, deney başlangıcından 10 dakika sonra numuneler tepsi içerisinden çıkartılmış, nemli bez yardımıyla yüzeyleri durulanmış, ağırlık ölçümleri yapıp tekrar tepsi içerisine yerleştirilmiştir. Aynı işlem 90. Dakikada da uygulanmış ve veriler kaydedilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Kılcallık deneyinin uygulanması

Kılcal su emme katsayısı aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.15).

Tablo 3.15. Kılcal su emme katsayısı formülü (TS EN 1015-18)

$c = 0,1x(M_2 - M_1)$	$c$ ; kılcal su emme katsayısı ( $kg/m^2.dak^{0.5}$ )
	$M_1$ ; su içerisindeki ağırlık (g) / 10. Dakika
	$M_2$ ; su içerisindeki ağırlık (g) / 90. Dakika

Tartım işlemi sonucu elde edilen veriler formül üzerinde kullanılmış ve numunelerin “Kılcal su emme katsayıları” tespit edilmiştir. Ortaya çıkan katsayılar, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Kılcallık (Kapilarite) deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.3.4. Su buharı geçirgenliği deneyi

Su buharı geçirgenliği deneyi “TS EN 1015-19” standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneye 80 mm çapta ve 10 mm kalınlıkta 6 adet yuvarlak numune tabii tutulmuştur. Deneyin amacı numunelerin alt ve üst yüzeylerini farklı oranlarda neme maruz bırakıp, yüksek nem ortamından düşük nem ortamına su buharı akışı sağlayarak numunelerin su buharı geçirgenliğini tespit etmektir. Bu kapsamda, numuneler uygun ölçülerdeki cam kaselelere yerleştirilerek numune alt yüzeylerinden (yüksek nemli ortam) numune üst yüzeylerine (düşük nemli ortam) doğru su buharı geçişi amaçlanmıştır. Alt yüzeylerde yüksek nemli ortam oluşturmak amacıyla oda sıcaklığındaki 1 litre saf suya yaklaşık 240 gram potasyum nitrat ( $KNO_3$ ) karıştırılmasıyla elde edilen doymuş çözelti hazırlanmıştır (Şekil 3.17). Çözelti, numune alt yüzeyleriyle arasında 10 mm kalacak şekilde cam kaselelere yerleştirilmiştir (Şekil 3.18). Su buharı geçişinin sadece yüzeylerdeki gözeneklerden gerçekleşmesini sağlamak amacıyla numune üst yüzeylerinin kenarlarına silikon uygulaması yapılmıştır. Deney düzeneklerinin hazırlanmasının ardından yüksek nem (%93,2 RH) ortamından düşük nem (%45 RH) ortamına ( $23^{\circ}C$ ) su buharı geçişi süreci başlatılmıştır. Numuneler 24 saat aralıklarla 10 gün boyunca hassas terazi üzerinde tartılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir (Şekil 3.19). Bu süre içerisinde doğrusal azalmanın meydana geldiği 4 günlük bölüm hesaplamalara dahil edilmiştir.



Şekil 3.17. Doymuş çözeltide kullanılan potasyum nitrat ( $KNO_3$ )



Şekil 3.18. Çözelti ile numune alt yüzeyi arasındaki boşluk



Şekil 3.19. T50 numunesinin 24 saat aralıklarla tartılması

Su buharı geçirgenliği değeri aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.16).

Tablo 3.16. Su buharı geçirgenliği hesaplanmasında kullanılan formül (TS EN 1015-19)

$\Lambda = \frac{1}{\frac{A \times \Delta p}{\Delta G} - R_A}$	$\Lambda$ ; birim su buharı geçirgenliği (kg/m <sup>2</sup> .s.Pa)
	$A$ ; numune yüzey alanı
	$\Delta p$ ; ortam havası ve çözelti arasındaki su buharı basınç farkı = 0,45 x P°su - 0,932 x P°su, 23°C'de P°su 2808 Pa alınır
	$\Delta G/\Delta t$ ; su buharı akımı (kg/s)
	$R_A$ ; numune ve çözelti arasındaki boşluğun 10 mm kalınlık için su buharı direnci (0,048 × 10 <sup>9</sup> Pa.m <sup>2</sup> .s/kg)

Formülde ( $\Delta G/\Delta t$ ) değeri, tartım işlemlerinde doğrusal azalmanın meydana geldiği 4 günlük geçiş miktarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Tüm verilerin formül üzerinde kullanılmasıyla numunelerin “Su buharı geçirgenlik değerleri” tespit edilmiştir. Değerler, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Su buharı geçirgenliği deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.4. Mekanik özellikler

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve don tesirine dayanım deneylerinin yöntemleri bu başlık altında ele alınmıştır.

#### 3.2.4.1. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı (3 noktadan eğme) deneyi Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM), Ar-Ge Laboratuvarında, SHIMADZU AGS-X cihazının 100 kN gövde seçeneğine sahip modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20). Çalışmalar “TS EN 1015-11” standardında yer alan “Eğilme Dayanımı Tayini” bölümünde belirtilen yöntem doğrultusunda yapılmıştır. Standarda göre deneyin prosedürü “*Deneye 160 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarında prizma şeklinde 3 adet numune tabi tutulmalıdır. Deney cihazı verilen şartları sağlamalı, bu doğrultuda cihaz altta 100,0 mm  $\pm$  0,5 mm aralıklarıyla yerleştirilmiş 45 mm-50 mm uzunluğa ve 10 mm  $\pm$  0,5 mm çapa sahip iki adet mesnet silindiri, üstte ise aynı uzunluk ve çapta, mesnet silindirlerinin ortasına merkezi olarak yerleştirilmiş bir yükleme silindirine sahip olmalıdır. Yükleme işleminde ise numuneye ani yük uygulamadan kaçınılmalı, 10 N/s ile 50 N/s arasında yükleme hızı sağlanarak numune kırılıncaya kadar sabit hızda yük uygulanmalıdır*” olarak açıklanmaktadır. Deney kapsamında, 7 ve 28 günlük numuneler kullanılarak priz süresinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin de tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 160 mm x 40 mm x 40 mm ölçülerinde her numune tipi için 6 adet (3 tanesi 7 günlük, 3 tanesi 28 günlük) toplamda ise 36 adet numune hazırlanmıştır. Deney cihazı standartta belirtildiği şekilde ayarlanmış ve numuneler teste tabi tutulmuştur (Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Deney kapsamında kullanılan cihaz



Şekil 3.21. Numunelerin kırılması

Eğilme dayanımı değeri aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.17).

Tablo 3.17. Eğilme dayanımı değerinin hesaplanmasında kullanılan formül (TS EN 1015-11)

$f_{cf} = \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{b \times d^2}$	$f_{cf}$ ; eğilme dayanımı değeri ( $N/mm^2$ )
	$F$ ; kırılma anındaki en büyük yük ( $N$ )
	$L$ ; mesnet silindirleri arasındaki açıklık ( $mm$ )
	$b$ ; numune genişliği ( $mm$ )
	$d$ ; numune yüksekliği ( $mm$ )

Mesnet silindirleri arasındaki mesafe 120 mm olarak ayarlanmıştır. Numunelerin en kesit boyları 40 milimetredir. Numunelerin kırılma anındaki en büyük değerler ise cihazdan elde edilmiştir. Verilerin formül üzerinde kullanılmasıyla numunelere ait “Eğilme dayanımı değeri” tespit edilmiştir. Değerler, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Eğilme dayanımı deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.4.2. Basınç dayanımı deneyi

Deney “TS EN 1015-11” standardında yer alan “Basınç Dayanımı Tayini” bölümünde belirtilen yöntem doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Standarda göre deneyin yöntemi “*Aksi belirtilmedikçe numuneler döküm işleminden 28 gün geçmesinin ardından muhafaza edildikleri ortamdan alındıktan hemen sonra veya eğilme dayanımı deneyinin hemen ardından teste tabi tutulmalıdır. Numune yüzeylerinde, cihazın yükleme başlıklarına temas edeceği bölgelerde herhangi bir yapışkan malzeme bulunmamalıdır. Cihazın başlıkları temiz bir bezle silinmeli ve numuneler bu alt ve üst başlık arasında numunenin herhangi bir kenarı yükleme başlıklarının en yakın kenarından 16 mm ± 0,1 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmelidir. Basınç esnasında numunelere ani yük uygulamadan, 50 N/s ile 500 N/s arasında yükleme hızı sağlanarak, numuneler kırılıncaya kadar sabit hızda düzgün bir şekilde artan yük uygulanmalıdır*” olarak belirtilmektedir. Bu kapsamda numuneler eğilme dayanımı deneyinin hemen ardından basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı deneyi, eğilme dayanımı deneyinin yapıldığı cihazda deneye uygun yükleme başlıklarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan 36 adet numunenin deney esnasında ikiye bölünmesiyle elde edilen toplam 72 adet numune basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Numunelerin 40 mm x 40 mm x 40 mm ölçülerindeki bölgesi basınca maruz bırakılmış ve kırılma anında cihazın verdiği N (Newton) değerleri kaydedilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Basınç dayanımı deneyinin uygulanması

Basınç dayanımı değeri aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Tablo 3.18).

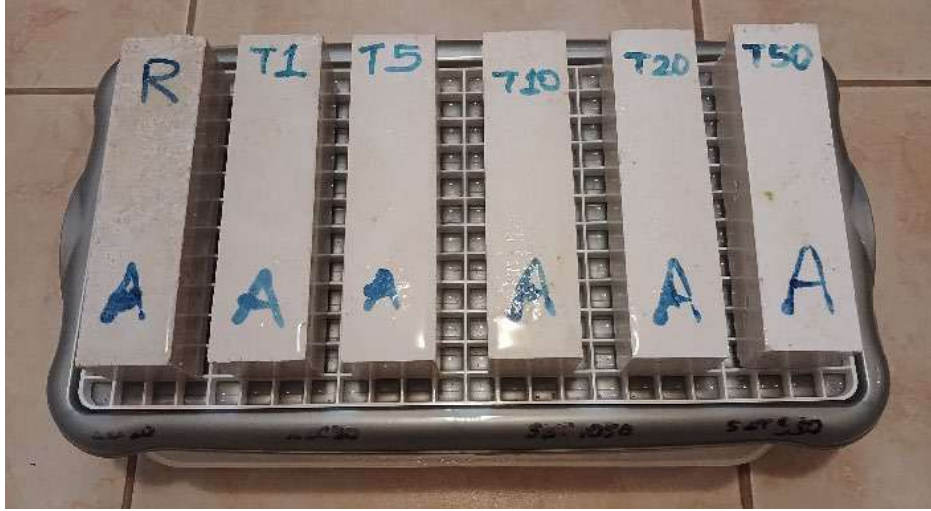
**Tablo 3.18.** Basınç dayanımı değerinin hesaplanmasında kullanılan formül (TS EN 1015-11)

$f_c = \frac{F}{A_c}$	<i>f<sub>c</sub>; basınç dayanımı değeri (N/mm<sup>2</sup>)</i>
	<i>F; kırılma anındaki en büyük yük (N)</i>
	<i>A<sub>c</sub>; numunenin yük doğrultusundaki kesit alanı (mm<sup>2</sup>)</i>

Numunelerin yük doğrultusundaki kesit alanı 1600 mm<sup>2</sup>'dir. Numunelerin kırılma anındaki en büyük değerler ise cihazdan elde edilmiştir. Verilerin formül üzerinde kullanılmasıyla numunelerin "Basınç dayanımı değerleri" tespit edilmiştir. Değerler, "Araştırma Bulguları ve Tartışma" bölümünde "Basınç dayanımı deneyi" başlığı altında paylaşılmıştır.

#### 3.2.4.3. Don tesirine dayanım deneyi

Deney, bir doktora çalışmasında (Dereli, 2019) önerilen yöntem doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Her numune tipi için 1 adet, toplamda ise 6 adet prizma şeklindeki numune deneye tabi tutulmuştur. Donması amaçlanan numunelerin suya doymun halde olmaları gerekmektedir. Bu yüzden kütlece su emme deneyinde uygulanan yöntemle numuneler suya doymun hale getirilmiştir (Şekil 3.23). Numuneler ilk başta -22°C ayarındaki dondurucuda 8 saat dondurulmuş, sonrasında ise 4 saat boyunca oda sıcaklığındaki su havuzunda çözülmeye bırakılmıştır. Bu donma ve çözülme işleminin tamamı "devir" olarak adlandırılmaktadır. Deney süresi boyunca numunelere 100 adet devir uygulaması yapılmıştır. 25 devirde bir numuneler yan çevrilerek her yüzeyin eşit tesire maruz bırakılması amaçlanmıştır. Bu yöntemle farklı içeriğe sahip malzemelerin don tesirine karşı dayanımları gözlemlenmiştir.



Şekil 3.23. Deney öncesi suya doymun hale getirilen numuneler

Düzenli olarak don tesiri uygulamasının numunelerin mekanik dayanımları üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla deneyin ardından sağlam kalan numuneler basınç testine de tabi tutulmuştur. Normal şartlar altında basınç dayanımı testi uygulanan numunelerden elde edilen verilerle, donma-çözünme deneyi sonrası basınç dayanımı testine tabi tutulan numunelerden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Numunelerin don tesirine karşı dayanımları ve sağlam kalan numunelerin basınç dayanımı değerleri “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Don tesirine dayanım deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

### 3.2.5. Mikroyapı özellikleri

Üretilen numunelerin mikroyapı özelliklerini belirlemek için yapılan taramalı elektron mikroskop ile analiz deneyinin yöntemi bu başlık altında ele alınmıştır.

#### 3.2.5.1. Taramalı elektron mikroskop ile analiz deneyi (Scanning electron microscope-SEM)

Deney Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM), SEM Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyin amacı; numune yüzeylerinde rasgele seçilen noktaların element analizini yapmak ve bu elementlerin dağılım oranlarından yola çıkarak numunelerin homojenlik durumunu tespit etmektir. Teste, 6 adet numunenin flex cihazıyla kesilmesi sonucu elde edilen ve yaklaşık

10 mm x 10 mm x 10 mm ölçülerinde örnek numune parçacıkları tabii tutulmuştur. Taramalı analiz işleminden önce örnek numune parçacıklarının yüzeylerine altın/paladyum kaplaması yapılmıştır (Şekil 3.24). Bu işlem “Denton Vacuum Desk V” cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.25). Yüzeyleri kaplanan numune örnekleri “HITACHI SU-1510” cihazında yüzey taraması işlemine tabii tutulmuştur (Şekil 3.26). Numune yüzeylerinde rastgele seçilen 3 farklı noktanın sırasıyla 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle resimler çekilmiştir. 500 kat büyütme yapıldığı esnada, seçilen noktadaki elementlerin bireysel dağılımlarını gösteren renkli haritalar da oluşturulmuş ve bu elementlerin dağılım oranları tespit edilmiştir.



Şekil 3.24. Yüzeyleri altın/paladyum ile kaplanan numune örnekleri



Şekil 3.25. Altın/paladyum kaplamasının yapıldığı cihaz



**Şekil 3.26.** Yüzey taraması işleminin yapıldığı cihaz

Numune yüzeylerinde seçilen noktaların 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler, bu noktalardaki elementlerin bireysel dağılımlarını gösteren renkli haritalar ve elementlerin dağılım oranları “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde “Taramalı elektron mikroskop ile analiz deneyi” başlığı altında paylaşılmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde materyal ve yöntem kapsamında yürütülen çalışmalardan elde edilen bulgular ve bu bulguların değerlendirilmesi yer almaktadır.

### 4.1. Bulgular

Fiziksel, mekanik ve mikroyapı özelliklerini belirlemek amacıyla birtakım deneylere tabi tutulan numunelere ait bulgular bu başlık altında paylaşılmıştır.

#### 4.1.1. Fiziksel özellikler

Numunelerin fiziksel özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan su emme, birim hacim ağırlık, kılcallık ve su buharı geçirgenliği deneylerinden elde edilen bulgular bu başlık altında ele alınmıştır.

##### 4.1.1.1. Su emme deneyleri

###### A) Kütlece su emme deneyi

Kütlece su emme deneyi kapsamında ölçümü yapılan suya doymun haldeki numunelerin ağırlıkları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** Suya doymun numunelerin ağırlıkları (g)

Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	595,0 g	598,8 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	597,4 g	600,3 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	610,0 g	599,7 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	602,7 g	601,3 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	592,1 g	595,2 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	584,0 g	580,5 g

Değişmez kütleye gelene kadar kurutulan numunelerin ağırlıkları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2.** Kuru numunelerin ağırlıkları (g)

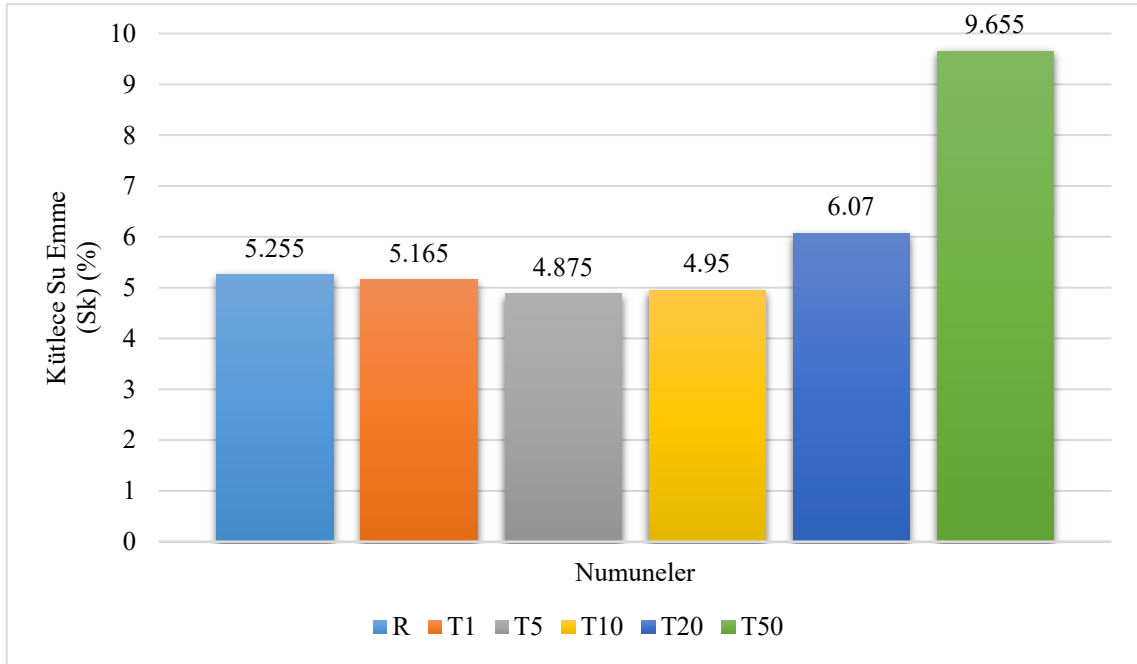
Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	565,2 g	569,0 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	568,1 g	570,8 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	582,3 g	571,2 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	574,0 g	573,2 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	558,1 g	561,3 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	533,0 g	529,0 g

Deneye tabi tutulan 12 adet numuneye ait kütlece su emme oranları numune bazlı ve ortalama olarak Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.3.** Numunelerin kütlece su emme oranları

Numune türü	Kütlece Su Emme = S <sub>k</sub> (%)		
	A grubu S <sub>k</sub> (%)	B grubu S <sub>k</sub> (%)	Ort. S <sub>k</sub> (%)
Referans numune (R)	5,27	5,24	<b>5,255</b> (±0,021)
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	5,16	5,17	<b>5,165</b> (±0,007)
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	4,76	4,99	<b>4,875</b> (±0,163)
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	5,00	4,90	<b>4,950</b> (±0,071)
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	6,10	6,04	<b>6,070</b> (±0,042)
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	9,57	9,74	<b>9,655</b> (±0,120)

Elde edilen verilere bakıldığında, en düşük kütlece su emme oranı %4,875 oranıyla karışımında %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T5), en yüksek kütlece su emme oranı ise %9,655 oranıyla karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numune (T50) üzerinde gözlemlenmiştir. Referans numuneye (R) ait kütlece su emme oranı ise %5,255 olarak tespit edilmiştir. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların kütlece su emme oranlarını düşürdüğü, %20-50 oranlarında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların kütlece su emme oranlarında artışa sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Numunelerin ortalama kütüce su emme oranları

## B) Hacimce su emme deneyi

Hacimce su emme deneyi kapsamında ölçümü yapılan suya doymun numunelerin su içindeki ağırlıkları Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Suya doymun numunelerin su içindeki ağırlıkları (g)

Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	327,7 g	330,2 g
%1 TiO <sub>2</sub> katkılı numune (T1)	330,4 g	332,1 g
%5 TiO <sub>2</sub> katkılı numune (T5)	341,0 g	334,8 g
%10 TiO <sub>2</sub> katkılı numune (T10)	334,6 g	333,7 g
%20 TiO <sub>2</sub> katkılı numune (T20)	328,2 g	329,9 g
%50 TiO <sub>2</sub> katkılı numune (T50)	323,0 g	320,2 g

Suya doymun haldeki numunelerin ağırlıkları Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Suya doymun numunelerin ağırlıkları (g)

Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	595,0 g	598,8 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	597,4 g	600,3 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	610,0 g	599,7 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	602,7 g	601,3 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	592,1 g	595,2 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	584,0 g	580,5 g

Kuru numunelerin ağırlıkları Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 4.6.** Kuru numunelerin ağırlıkları (g)

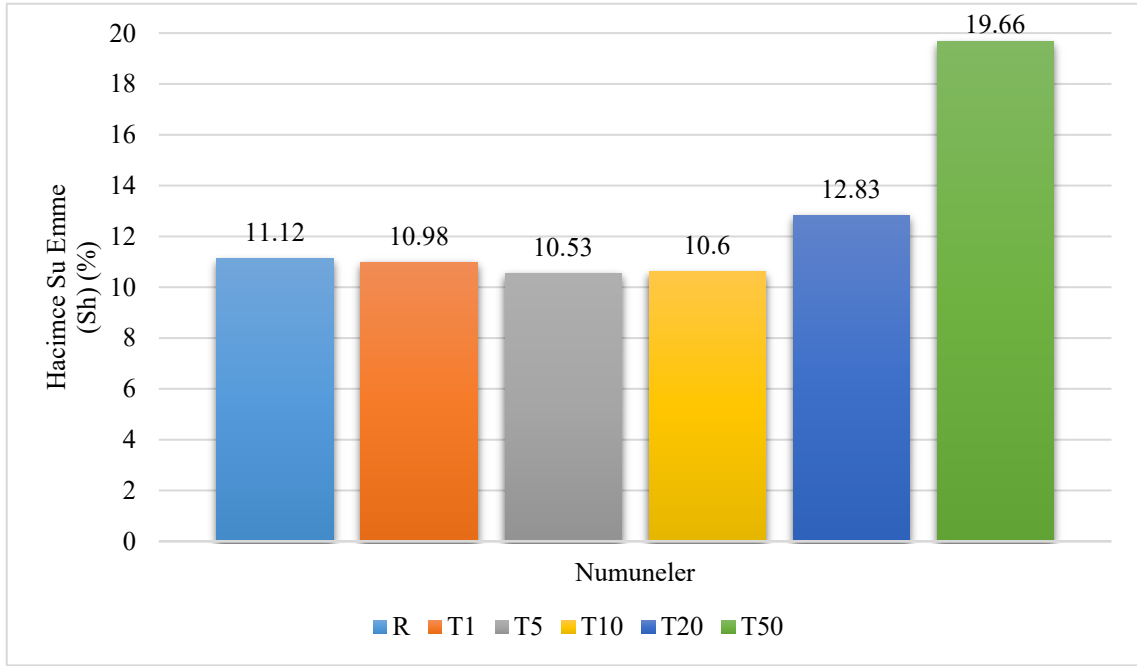
Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	565,2 g	569,0 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	568,1 g	570,8 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	582,3 g	571,2 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	574,0 g	573,2 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	558,1 g	561,3 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	533,0 g	529,0 g

Deneye tabi tutulan 12 adet numuneye ait hacimce su emme oranları numune bazlı ve ortalama olarak Tablo 4.7'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.7.** Numunelerin hacimce su emme oranları

Numune türü	Hacimce Su Emme = S <sub>h</sub> (%)		
	A grubu S <sub>h</sub> (%)	B grubu S <sub>h</sub> (%)	Ort. S <sub>h</sub> (%)
Referans numune (R)	11,15	11,09	<b>11,120</b> (±0,042)
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	10,97	10,99	<b>10,980</b> (±0,014)
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	10,30	10,76	<b>10,530</b> (±0,325)
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	10,70	10,50	<b>10,600</b> (±0,141)
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	12,88	12,78	<b>12,830</b> (±0,071)
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	19,54	19,78	<b>19,660</b> (±0,170)

Elde edilen verilere bakıldığında, en düşük hacimce su emme oranı %10,530 oranıyla karışımında %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T5), en yüksek hacimce su emme oranı ise %19,660 oranıyla karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numune (T50) üzerinde gözlemlenmiştir. Referans numuneye (R) ait hacimce su emme oranı ise %11,120 olarak tespit edilmiştir. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların hacimce su emme oranlarını düşürdüğü, %20-50 oranlarında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların hacimce su emme oranlarında artışa sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Numunelerin ortalama hacimce su emme oranları

#### 4.1.1.2. Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi kapsamında ölçümü yapılan kuru haldeki numunelerin ağırlıkları Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Kuru numunelerin ağırlıkları (g)

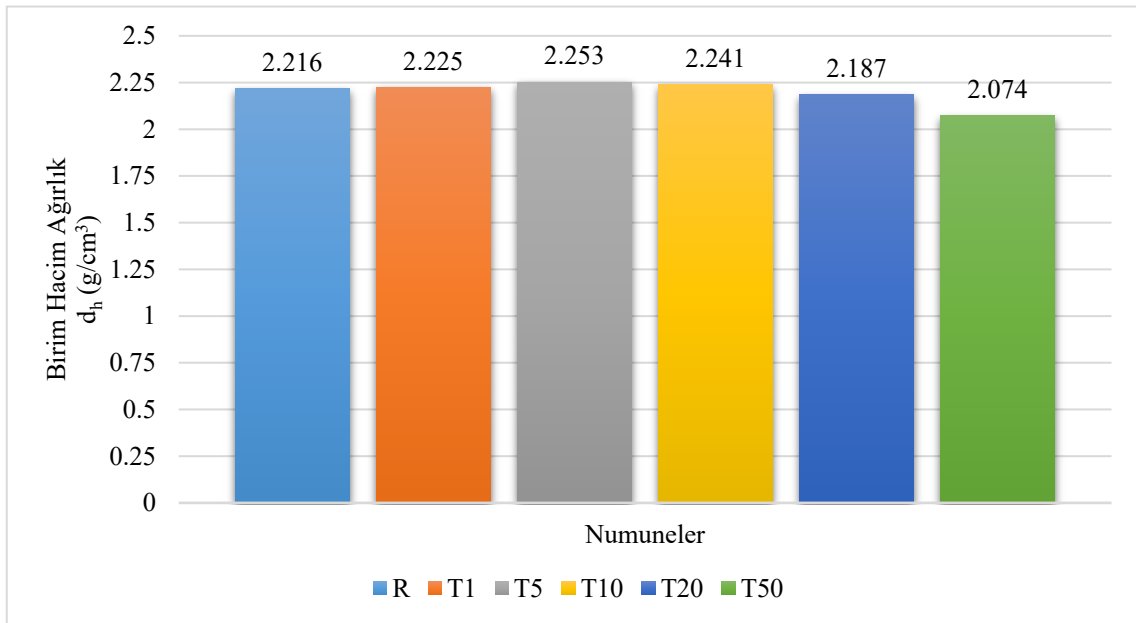
Numune türü	A grubu / Ağırlık (g)	B grubu / Ağırlık (g)
Referans numune (R)	565,2 g	569,0 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	568,1 g	570,8 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	582,3 g	571,2 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	574,0 g	573,2 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	558,1 g	561,3 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	533,0 g	529,0 g

Numunelere ait birim hacim ağırlık değerleri numune bazlı ve ortalama olarak Tablo 4.9’da gösterilmektedir.

**Tablo 4.9.** Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri

Numune türü	Birim Hacim Ağırlık = $d_h(\text{g/cm}^3)$		
	A grubu $d_h(\text{g/cm}^3)$	B grubu $d_h(\text{g/cm}^3)$	Ort. $d_h(\text{g/cm}^3)$
Referans numune (R)	2,208	2,223	<b>2,216</b> ( $\pm 0,011$ )
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	2,219	2,230	<b>2,225</b> ( $\pm 0,008$ )
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	2,275	2,231	<b>2,253</b> ( $\pm 0,031$ )
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	2,242	2,239	<b>2,241</b> ( $\pm 0,002$ )
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	2,180	2,193	<b>2,187</b> ( $\pm 0,009$ )
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	2,082	2,066	<b>2,074</b> ( $\pm 0,011$ )

Elde edilen verilere bakıldığında, en düşük birim hacim ağırlık değeri ( $d_h$ ) 2,074 g/cm<sup>3</sup> ile karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T50), en yüksek birim hacim ağırlık değeri ( $d_h$ ) ise 2,253 g/cm<sup>3</sup> ile karışımında %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T5) gözlemlenmiştir. Referans numuneye (R) ait birim hacim ağırlık değeri ( $d_h$ ) 2,216 g/cm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların birim hacim ağırlık değerlerini artırdığı, %20-50 oranlarında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların birim hacim ağırlık değerlerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.3).

**Şekil 4.3.** Numunelerin ortalama birim hacim ağırlık değerleri

#### 4.1.1.3. Kılcallık (Kapilarite) deneyi

Kılcallık deneyi kapsamında yapılan ölçümlerden elde edilen numune ağırlık verileri Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

**Tablo 4.10.** Numune ağırlıkları (g)

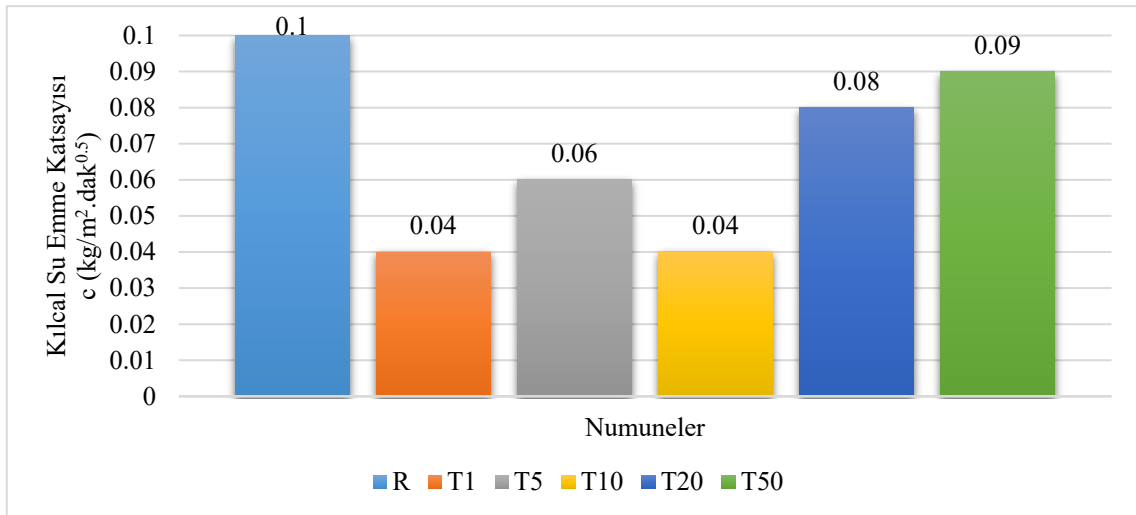
Numune türü	Kuru ağırlık (g) (M <sub>0</sub> )	Su içerisindeki ağırlık (g) / 10. Dakika (M <sub>1</sub> )	Su içerisindeki ağırlık (g) / 90. Dakika (M <sub>2</sub> )
Referans numune (R)	551,9 g	552,5 g	553,5 g
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	564,1 g	564,2 g	564,6 g
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	567,8 g	568,1 g	568,7 g
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	562,2 g	562,4 g	562,8 g
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	554,1 g	554,2 g	555,0 g
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	522,6 g	522,7 g	523,6 g

6 adet numunenin kılcal su emme katsayıları Tablo 4.11'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.11.** Numunelerin kılcal su emme katsayıları

Numune türü	Kılcal Su Emme Katsayısı c (kg/m <sup>2</sup> .dak <sup>0.5</sup> )
Referans numune (R)	0,10
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	0,04
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	0,06
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	0,04
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	0,08
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	0,09

Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek kılcal su emme katsayısının (c) 0,10 kg/m<sup>2</sup>.dak<sup>0.5</sup> değeri ile referans numunede (R), en düşük kılcal su emme katsayısının (c) ise 0,04 kg/m<sup>2</sup>.dak<sup>0.5</sup> değeri ile karışımlarında %1 (T1) ve %10 (T10) TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde olduğu gözlemlenmektedir. Deney sonucunda, referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların kılcal su emme katsayılarında azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Numunelerin kılcal su emme katsayıları

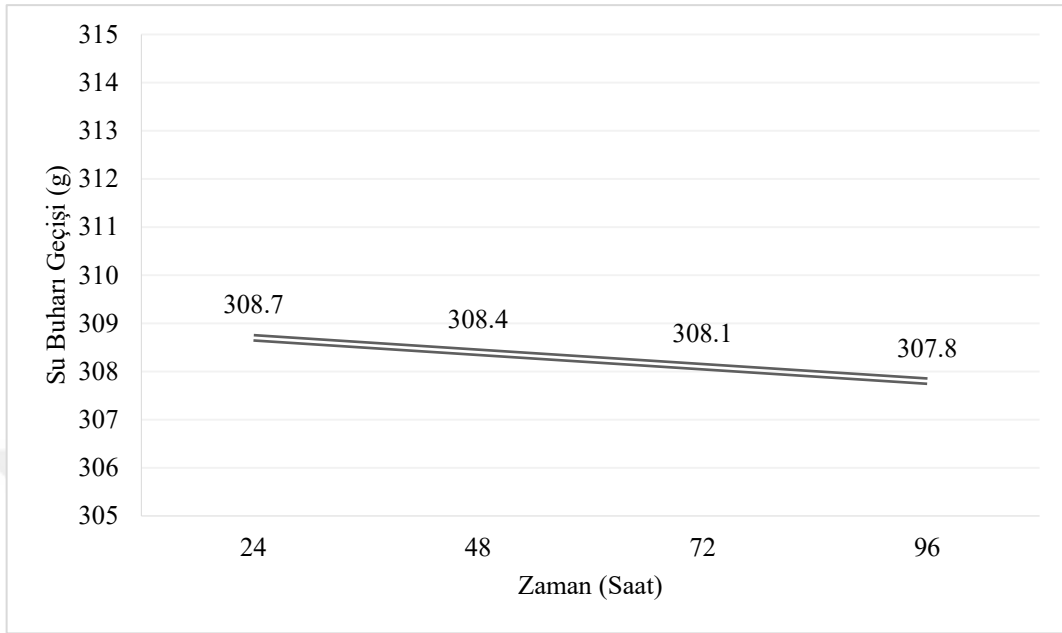
#### 4.1.1.4. Su buharı geçirgenliği deneyi

Su buharı geçirgenliği deneyi kapsamında numunelerin 24 saat aralıklarla 10 gün boyunca tartılması sonucu elde edilen ağırlık verileri Tablo 4.12’de gösterilmektedir.

Tablo 4.12. Numunelerin 10 gün boyunca tartılması sonucu elde edilen veriler

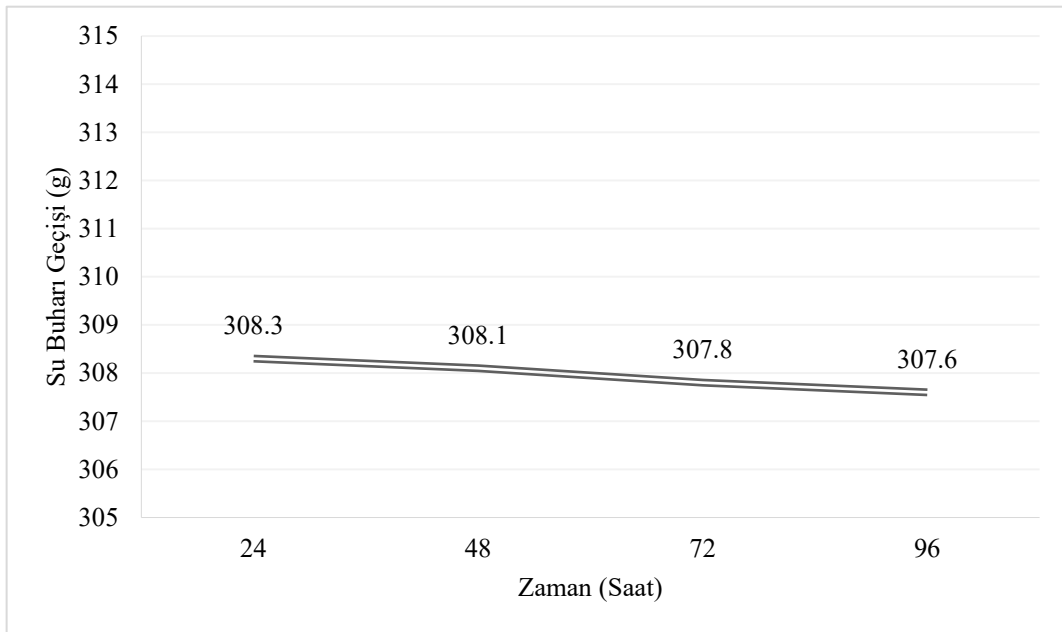
Su Buharı Geçiş (g)	Numune Türü					
	Referans Numune (R)	%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)
1.Gün Ağırlığı (g)	308,7 g	308,3 g	307,8 g	314,7 g	313,2 g	311,9 g
2.Gün Ağırlığı (g)	308,4 g	308,1 g	307,6 g	314,5 g	312,9 g	311,5 g
3.Gün Ağırlığı (g)	308,1 g	307,8 g	307,3 g	314,3 g	312,6 g	311,0 g
4.Gün Ağırlığı (g)	307,8 g	307,6 g	307,0 g	314,0 g	312,2 g	310,6 g
5.Gün Ağırlığı (g)	307,6 g	307,3 g	306,7 g	313,8 g	311,8 g	310,1 g
6.Gün Ağırlığı (g)	307,3 g	307,2 g	306,6 g	313,6 g	311,6 g	309,8 g
7.Gün Ağırlığı (g)	307,1 g	307,0 g	306,4 g	313,4 g	311,3 g	309,5 g
8.Gün Ağırlığı (g)	306,8 g	306,8 g	306,1 g	313,1 g	310,9 g	309,1 g
9.Gün Ağırlığı (g)	306,6 g	306,6 g	305,8 g	312,9 g	310,7 g	308,8 g
10.Gün Ağırlığı (g)	306,3 g	306,3 g	305,6 g	312,7 g	310,4 g	308,4 g

Referans numunede (R) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,30 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.5).



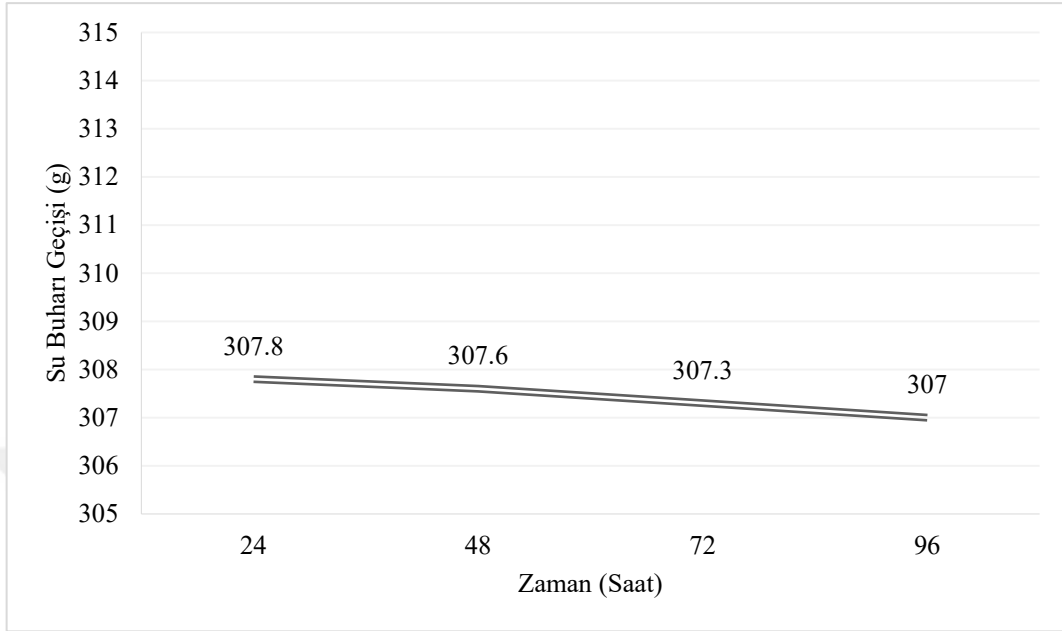
Şekil 4.5. Referans numunenin (R) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

%1 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T1) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,23 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6).



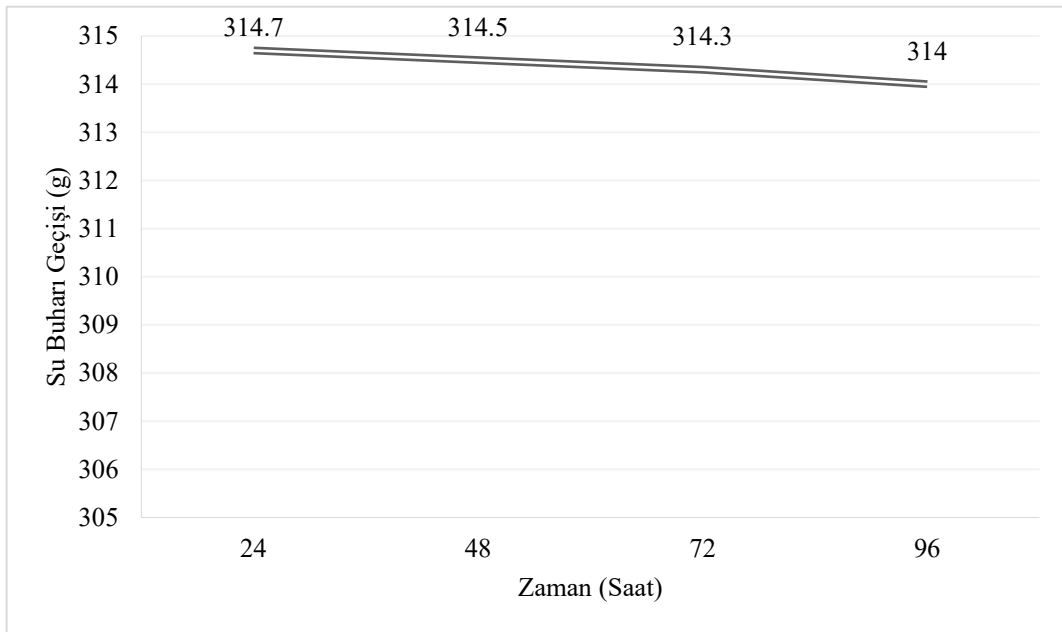
Şekil 4.6. %1 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T1) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

%5 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T5) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,27 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.7).



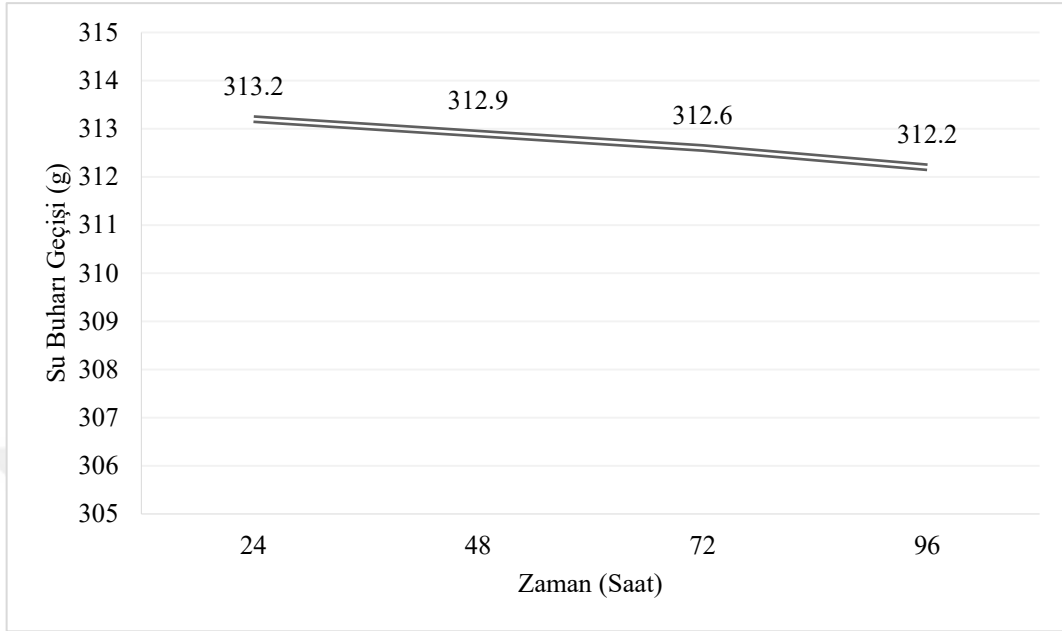
Şekil 4.7. %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T5) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

%10 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T10) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,23 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.8).



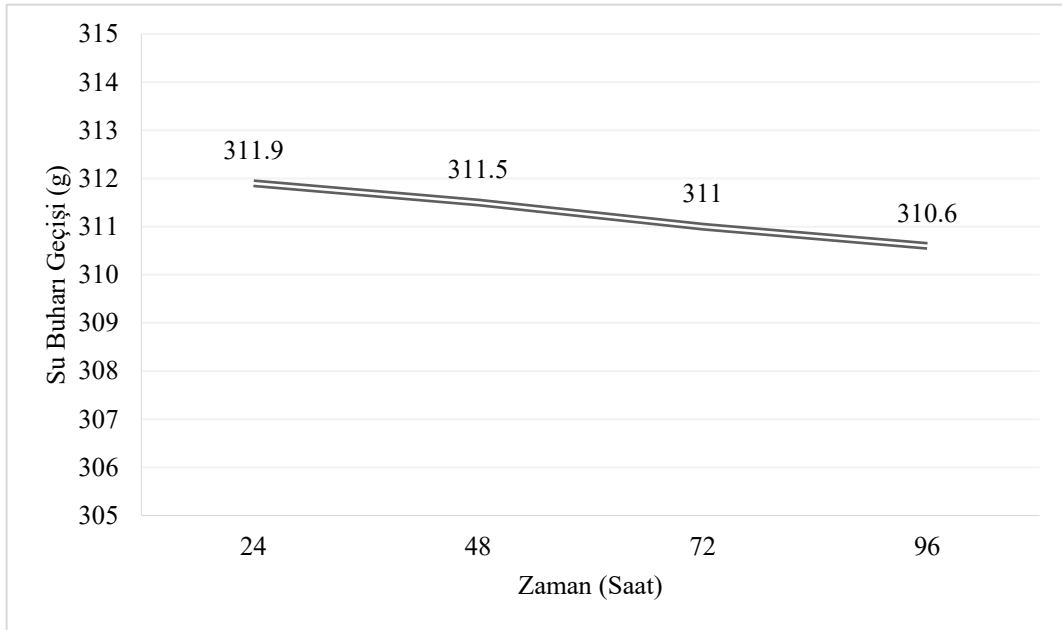
Şekil 4.8. %10 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T10) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

%20 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T20) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,33 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. %20 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T20) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

%50 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T50) doğrusal azalmanın meydana geldiği ilk 4 gündeki ortalama su buharı geçiş farkı 0,43 g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.10).



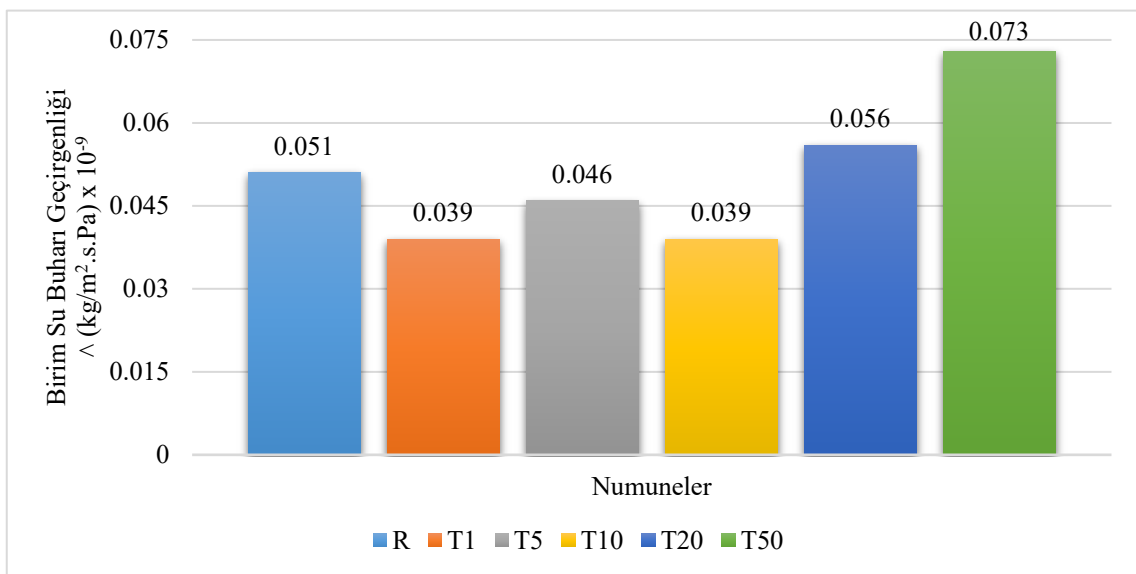
Şekil 4.10. %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T50) su buharı geçirgenliği-zaman grafiği

6 adet numunenin birim su buharı geçirgenliği değerleri Tablo 4.13'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.13.** Numunelerin birim su buharı geçirgenliği değerleri

Numune türü	Birim Su Buharı Geçirgenliği $\wedge$ (kg/m <sup>2</sup> .s.Pa)
Referans numune (R)	0,051x10 <sup>-9</sup>
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	0,039x10 <sup>-9</sup>
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	0,046x10 <sup>-9</sup>
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	0,039x10 <sup>-9</sup>
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	0,056x10 <sup>-9</sup>
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	0,073x10 <sup>-9</sup>

Elde edilen veriler incelendiğinde, en düşük birim su buharı geçirgenliği ( $\wedge$ ) 0,039x10<sup>-9</sup> (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa) değeri ile karışımlarında %1 (T1) ve %10 (T10) TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde, en yüksek birim su buharı geçirgenliği ise 0,073x10<sup>-9</sup> (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa) değeri ile karışımında %50 oranında TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T50) olduğu ortaya çıkmaktadır. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların birim su buharı geçirgenliğini azalttığı, %20-50 oranlarında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların birim su buharı geçirgenliğinde artmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11.** Numunelerin birim su buharı geçirgenliği değerleri

#### 4.1.2. Mekanik özellikler

Numunelerin mekanik özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve don tesirine dayanım deneylerinden elde edilen bulgular bu başlık altında ele alınmıştır.

##### 4.1.2.1. Eğilme dayanımı deneyi

7. ve 28. Gün numunelerinin kırılma anındaki ortalama maksimum yük değerleri Tablo 4.14'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.14.** Numunelerin kırılma anındaki ortalama maksimum yük değerleri

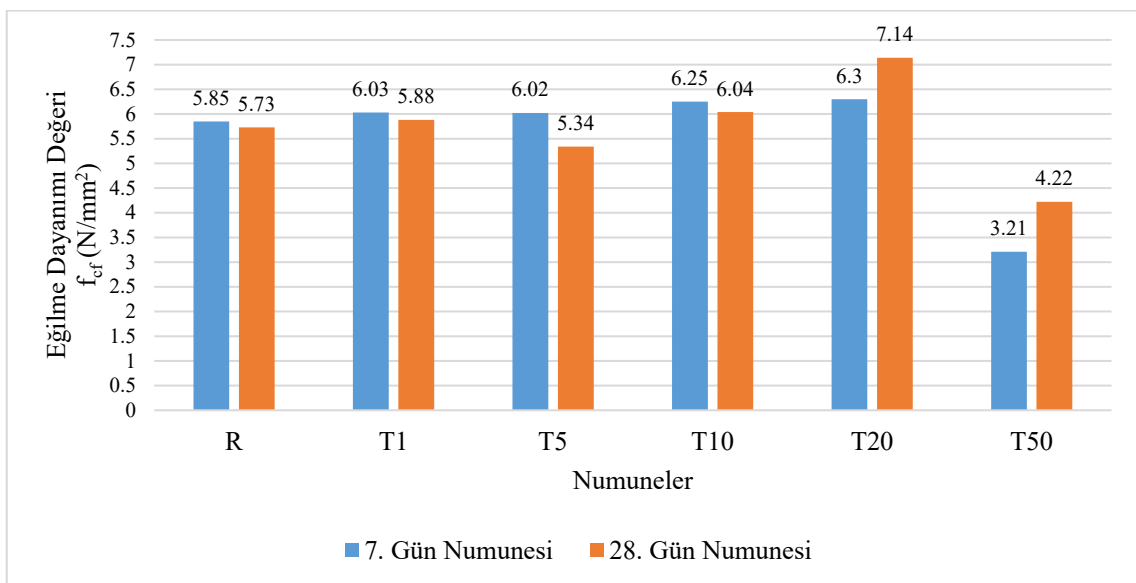
Numune türü	Kırılma Anındaki Maksimum Yük = F (N)	
	7. Gün Numunesi	28. Gün Numunesi
Referans numune (R)	<b>2081,08</b> ( $\pm 130,593$ )	<b>2037,91</b> ( $\pm 298,013$ )
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	<b>2143,91</b> ( $\pm 138,838$ )	<b>2090,99</b> ( $\pm 168,065$ )
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	<b>2140,75</b> ( $\pm 84,922$ )	<b>1898,64</b> ( $\pm 270,265$ )
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	<b>2222,07</b> ( $\pm 116,481$ )	<b>2148,66</b> ( $\pm 25,518$ )
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	<b>2238,80</b> ( $\pm 56,195$ )	<b>2540,17</b> ( $\pm 193,687$ )
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	<b>1141,44</b> ( $\pm 36,238$ )	<b>1501,24</b> ( $\pm 65,079$ )

7. ve 28. Gün numunelerinin ortalama eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.15'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.15.** Numunelerin ortalama eğilme dayanımı değerleri

Numune türü	Eğilme Dayanımı Değeri = $f_{cf}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
	7. Gün Numunesi	28. Gün Numunesi
Referans numune ( <b>R</b> )	<b>5,85</b> ( $\pm 0,367$ )	<b>5,73</b> ( $\pm 0,838$ )
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune ( <b>T1</b> )	<b>6,03</b> ( $\pm 0,390$ )	<b>5,88</b> ( $\pm 0,473$ )
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune ( <b>T5</b> )	<b>6,02</b> ( $\pm 0,239$ )	<b>5,34</b> ( $\pm 0,760$ )
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune ( <b>T10</b> )	<b>6,25</b> ( $\pm 0,328$ )	<b>6,04</b> ( $\pm 0,072$ )
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune ( <b>T20</b> )	<b>6,30</b> ( $\pm 0,158$ )	<b>7,14</b> ( $\pm 0,545$ )
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune ( <b>T50</b> )	<b>3,21</b> ( $\pm 0,102$ )	<b>4,22</b> ( $\pm 0,183$ )

Elde edilen verilere bakıldığında, en yüksek eğilme dayanımı değeri ( $f_{cf}$ ) 7. Günde 6,30 N/mm<sup>2</sup> ve 28. Günde 7,14 N/mm<sup>2</sup> ile karışımında %20 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde (T20) gözlemlenmiştir. En düşük eğilme dayanımı değerinin ( $f_{cf}$ ) ise 7. Günde 3,21 N/mm<sup>2</sup> ve 28. Günde 4,14 N/mm<sup>2</sup> ile karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde (T50) olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında, T20 ve T50 numuneleri dışında 7 günlük numunelerin 28 günlük numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı değerine ( $f_{cf}$ ) sahip olduğu gözlemlenmektedir. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %20'ye kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların eğilme dayanımı değerlerini artırdığı, %50 oranında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların eğilme dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.12).

**Şekil 4.12.** Numunelerin eğilme dayanımı değerleri

#### 4.1.2.2. Basınç dayanımı deneyi

7. ve 28. Gün numunelerinin kırılma anındaki ortalama maksimum yük değerleri Tablo 4.16’da gösterilmektedir.

**Tablo 4.16.** Numunelerin kırılma anındaki ortalama maksimum yük değerleri

Numune türü	Kırılma Anındaki Maksimum Yük = F (N)	
	7. Gün Numunesi	28. Gün Numunesi
Referans numune (R)	71506,5 (±5963,62)	80179,6 (±3424,07)
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	73804,9 (±4329,17)	71083,9 (±5170,05)
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	73844,9 (±2745,43)	71220,9 (±5779,74)
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	61282,0 (±3697,75)	78638,9 (±3409,18)
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	58106,2 (±1906,06)	70140,4 (±4048,32)
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	21291,1 (±736,091)	28184,9 (±1908,64)

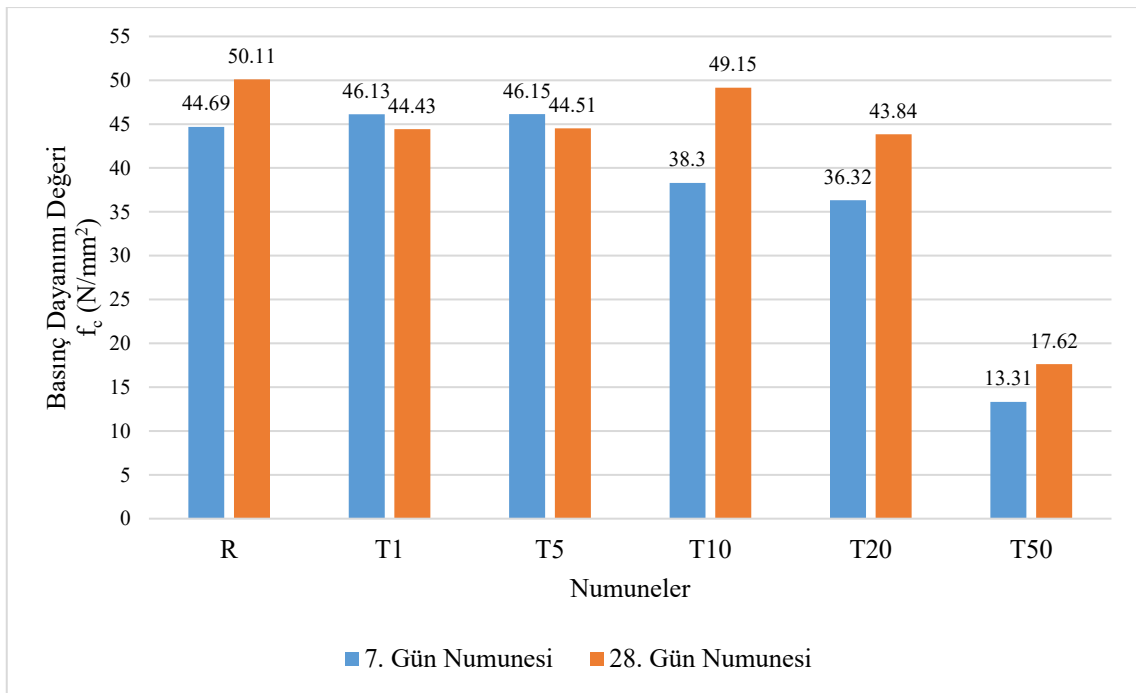
7. ve 28. Gün numunelerinin ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 4.17’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.17.** Numunelerin ortalama basınç dayanımı değerleri

Numune türü	Basınç Dayanımı Değeri = $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	
	7. Gün Numunesi	28. Gün Numunesi
Referans numune (R)	44,69 (±3,727)	50,11 (±2,140)
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	46,13 (±2,706)	44,43 (±3,231)
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	46,15 (±1,716)	44,51 (±3,612)
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	38,30 (±2,311)	49,15 (±2,131)
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	36,32 (±1,191)	43,84 (±2,530)
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	13,31 (±0,460)	17,62 (±1,193)

Sonuçlar incelendiğinde, 7. Günde en yüksek basınç dayanımı değerinin ( $f_c$ ) 46,15 N/mm<sup>2</sup> ile karışımında %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde (T5), 28. Günde en yüksek basınç dayanımı değerinin ( $f_c$ ) ise 50,11 N/mm<sup>2</sup> ile referans numunelerde (R) olduğu

gözlemlenmektedir. En düşük basınç dayanımı değerinin ( $f_c$ ) 7. Günde 13,31 N/mm<sup>2</sup> ve 28. Günde 17,62 N/mm<sup>2</sup> ile karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunelerde (T50) olduğu görülmektedir. Genel olarak bakıldığında, T1 ve T5 numuneleri dışında 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değerine ( $f_c$ ) sahip olduğu tespit edilmiştir. Referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %20'ye kadar titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ilavesinin karışımların basınç dayanımı değerlerini benzer oranlarda etkilediği, %50 oranında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise karışımların basınç dayanımı değerlerinde ciddi azalmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Numunelerin basınç dayanımı değerleri

#### 4.1.2.3. Don tesirine dayanım deneyi

Numunelerin don tesirine karşı dayanımlarını tespit etmek için yapılan donma-çözülme eylemlerinin numuneler üzerindeki etkisi Tablo 4.18'de paylaşılmıştır.

**Tablo 4.18.** 100 devirlik donma-çözülme eylemlerinin numuneler üzerindeki etkisi

Devir	Numune Türü					
	R	T1	T5	T10	T20	T50
1. Devir						
2. Devir						
3. Devir						
4. Devir						
5. Devir						
6. Devir						
7. Devir						
8. Devir						
9. Devir						
10. Devir						
11. Devir						
12. Devir						
13. Devir						
14. Devir						
15. Devir						
16. Devir						
17. Devir						
18. Devir						
19. Devir						
20. Devir						
21. Devir						
22. Devir						
23. Devir						
24. Devir						
25. Devir						
26. Devir						
27. Devir						
28. Devir						
29. Devir						
30. Devir						
31. Devir						
32. Devir						
33. Devir						
34. Devir						
35. Devir						
36. Devir						
37. Devir						
38. Devir						
39. Devir						
40. Devir						
41. Devir						
42. Devir						
43. Devir						
44. Devir						
45. Devir						
46. Devir						
47. Devir						
48. Devir						
49. Devir						
50. Devir						
51. Devir						
52. Devir						
53. Devir						
54. Devir						
55. Devir						
56. Devir						
57. Devir						
58. Devir						
59. Devir						
60. Devir						
61. Devir						
62. Devir						
63. Devir						
64. Devir						
65. Devir						
66. Devir						
67. Devir						





a. 13. Devir

b. 14. Devir

c. 18. Devir



d. 19. Devir

e. 63. Devir

f. 94. Devir

Şekil 4.14. T50 numunesinde meydana gelen değişimler



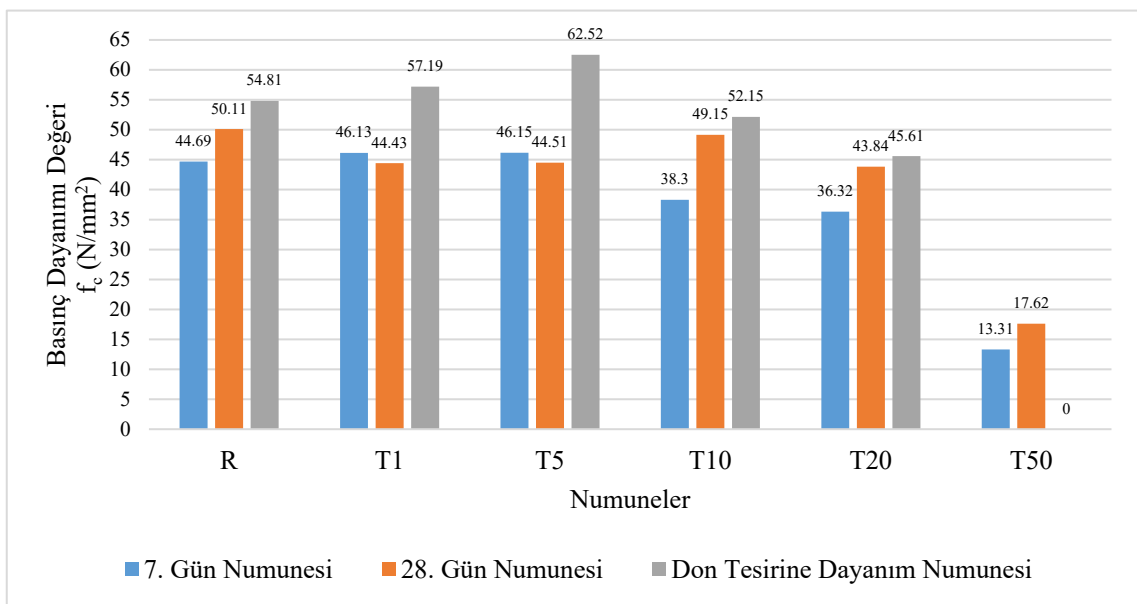
Şekil 4.15. Deneyin ardından numunelerin son hali

Sağlam kalan numuneler basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve numunelerinin kırılma anındaki ortalama maksimum yük değerleri ve ortalama basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir (Tablo 4.19).

**Tablo 4.19.** Sağlam kalan numunelerin basınç deneyi verileri

Numune türü (Don Tesirine Dayanım Numunesi)	Kırılma Anındaki Maksimum Yük F (N)	Basınç Dayanımı Değeri $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
Referans numune (R)	87701,6 ( $\pm$ 300,38)	54,81 ( $\pm$ 0,188)
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	91506,7 ( $\pm$ 7548,86)	57,19 ( $\pm$ 4,717)
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	100031 ( $\pm$ 16,97)	62,52 ( $\pm$ 0,011)
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	83436,9 ( $\pm$ 3576,77)	52,15 ( $\pm$ 2,236)
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	72974,3 ( $\pm$ 4868,85)	45,61 ( $\pm$ 3,043)
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	0	0

Elde edilen verilere bakıldığında, don tesirine dayanım deneyine tabi tutulan numunelerden en yüksek basınç dayanımı değeri ( $f_c$ ) 62,52 N/mm<sup>2</sup> ile karışımında %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T5) tespit edilmiştir. Donma-çözünme uygulamasına tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin, normal şartlar altında teste tabi tutulan 7. ve 28. Gün numunelerinin basınç dayanımı değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.16).



**Şekil 4.16.** Numunelerin basınç dayanımı değerleri

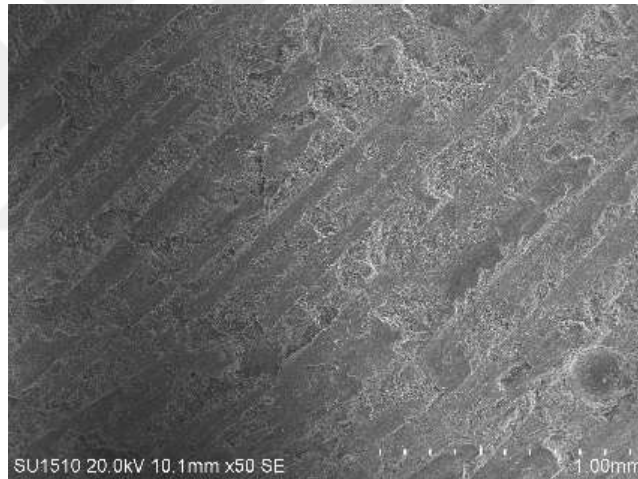
### 4.1.3. Mikroyapı özellikleri

Numunelerin mikroyapı özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan taramalı elektron mikroskop ile analiz deneyinden elde edilen bulgular bu başlık altında ele alınmıştır.

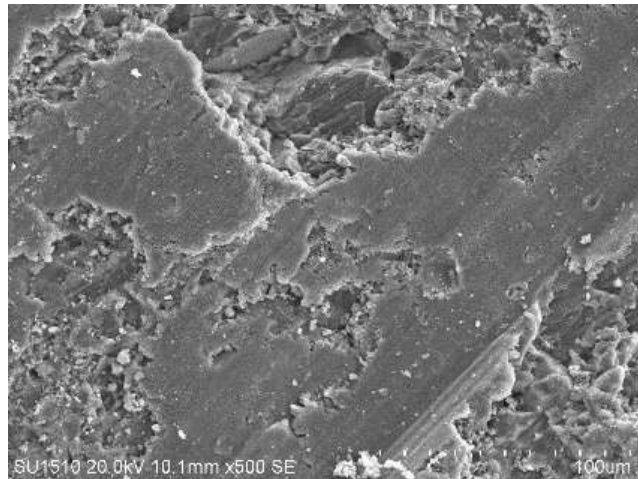
#### 4.1.3.1. Taramalı elektron mikroskop ile analiz deneyi (Scanning electron microscope-SEM)

##### A) Referans numunenin (R) mikroyapısı

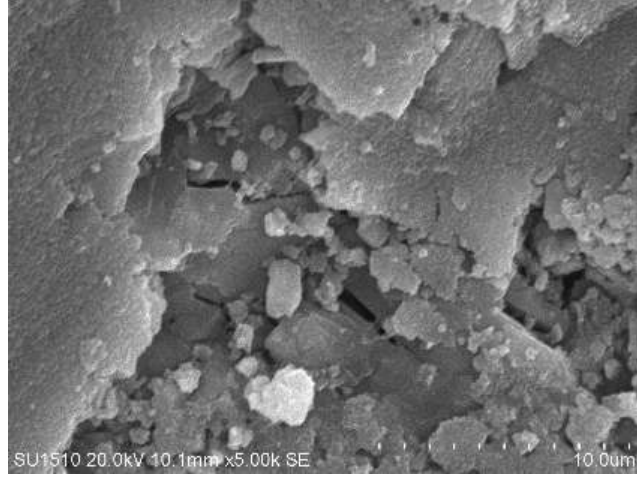
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



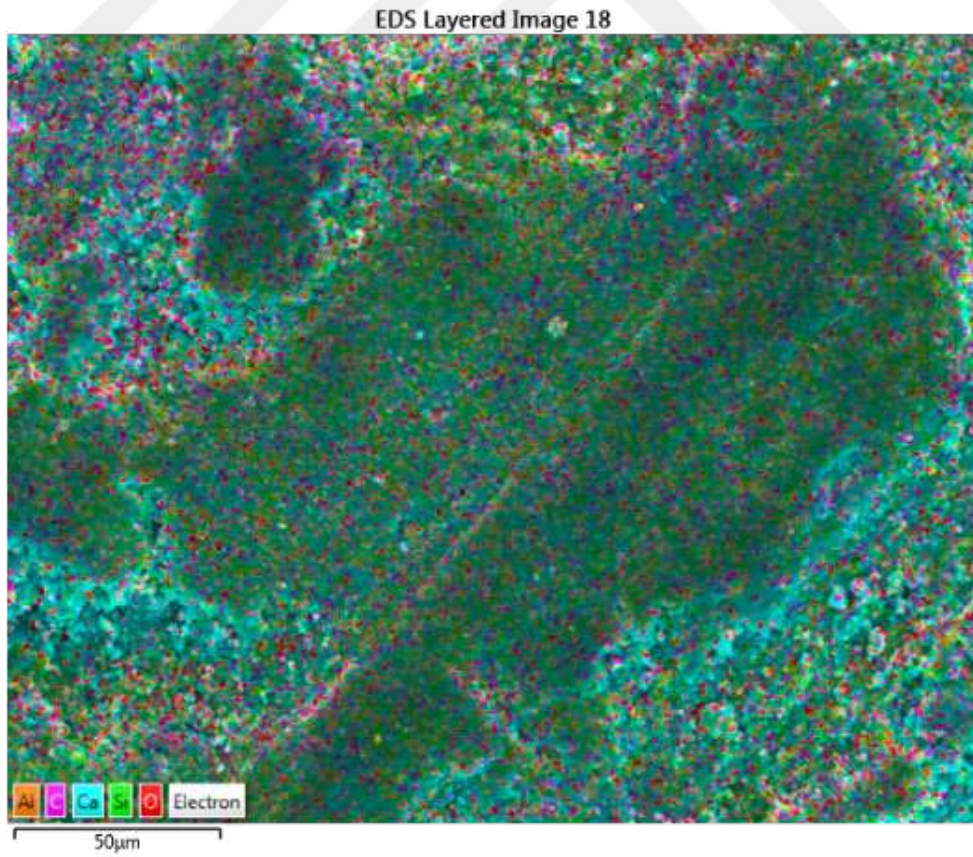
b. 500 kat büyütme



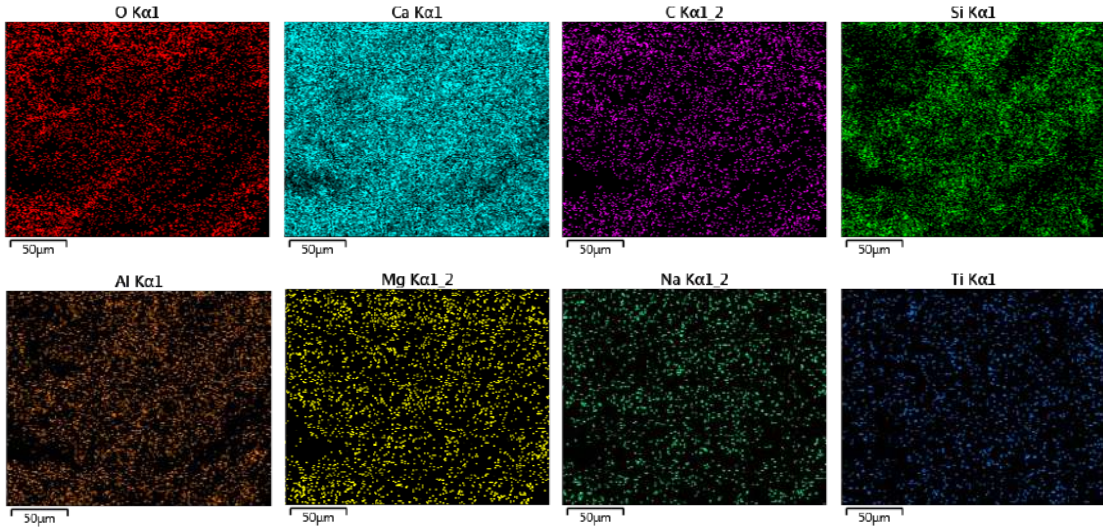
c. 5000 kat büyütme

Şekil 4.17. “R” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.18’de, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.18. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.19. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.20’de paylaşılmıştır.

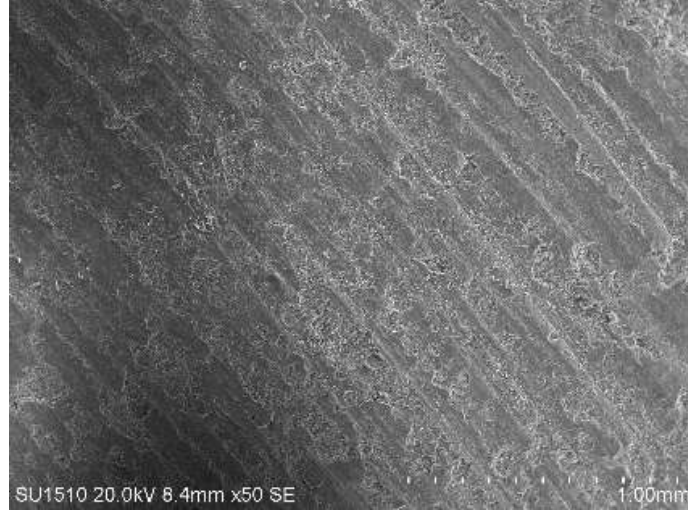
Tablo 4.20. 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (R)

Referans Numune (R)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	47,06 (±2,699)
Kalsiyum (Ca)	31,11 (±1,604)
Karbon (C)	16,01 (±1,673)
Silisyum (Si)	4,01 (±0,486)
Alüminyum (Al)	1,03 (±0,031)
Magnezyum (Mg)	0,42 (±0,031)
Sodyum (Na)	0,17 (±0,036)
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>0,11 (±0,020)</b>

Referans numunesindeki 3 farklı noktada ortalama %0,11 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

### B) %1 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T1) mikroyapısı

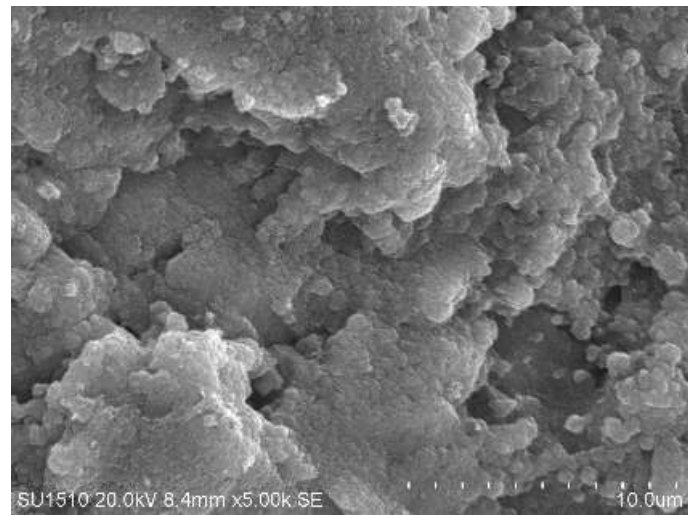
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.20’de gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



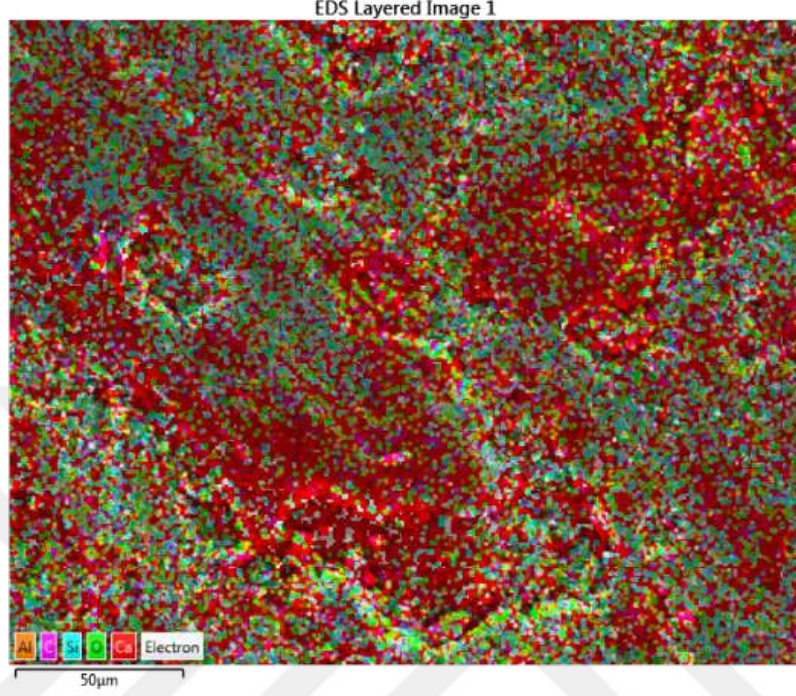
b. 500 kat büyütme



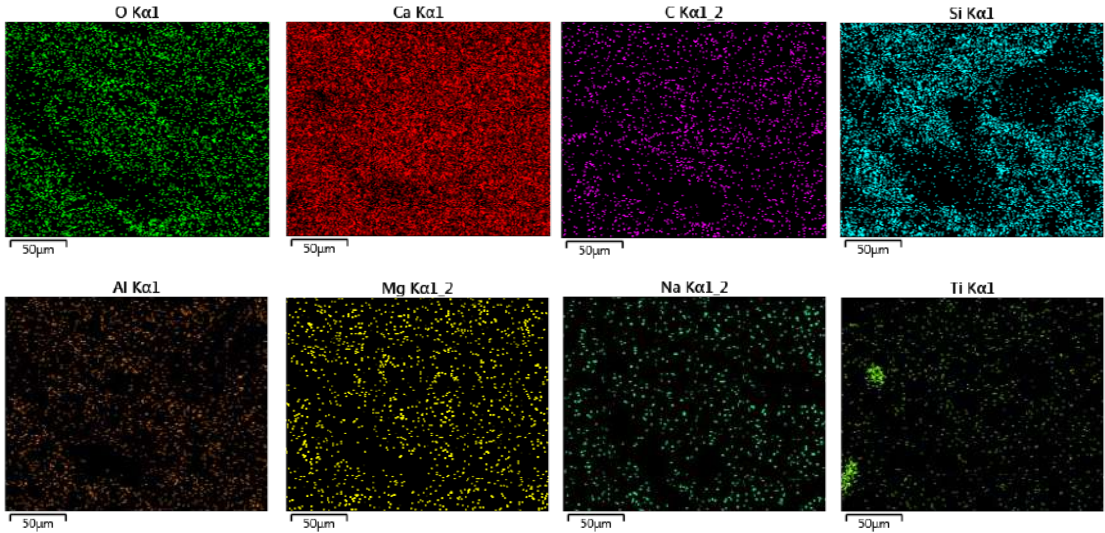
c. 5000 kat büyütme

Şekil 4.20. “T1” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.21’de, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.22. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.21’de paylaşılmıştır.

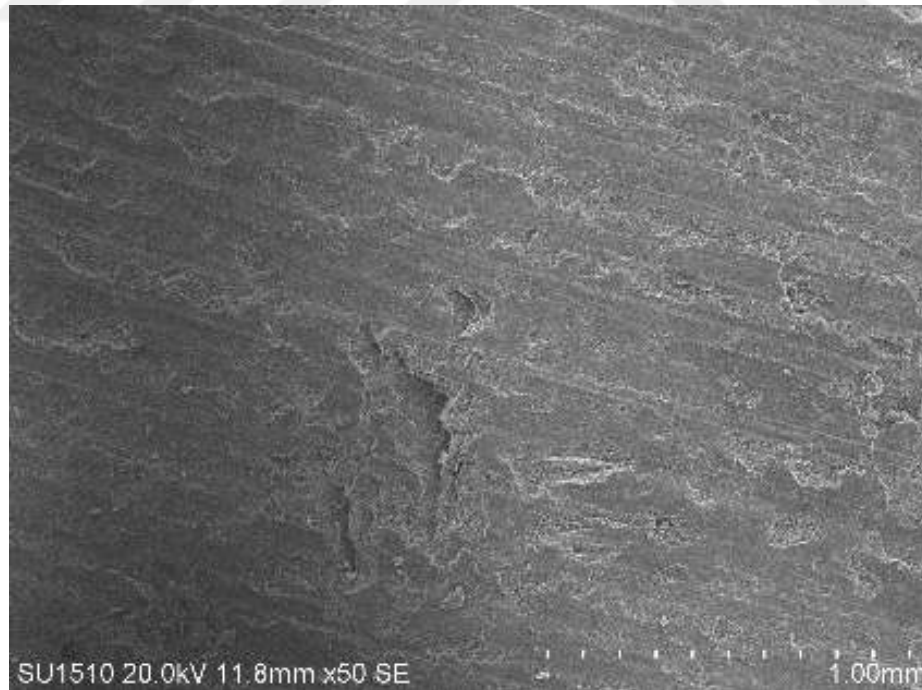
**Tablo 4.21.** 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (T1)

%1 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune (T1)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	49,96 (±2,845)
Kalsiyum (Ca)	29,55 (±0,941)
Karbon (C)	15,70 (±2,299)
Silisyum (Si)	3,05 (±1,027)
Alüminyum (Al)	0,71 (±0,123)
Magnezyum (Mg)	0,39 (±0,337)
Sodyum (Na)	0,20 (±0,191)
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>0,44 (±0,200)</b>

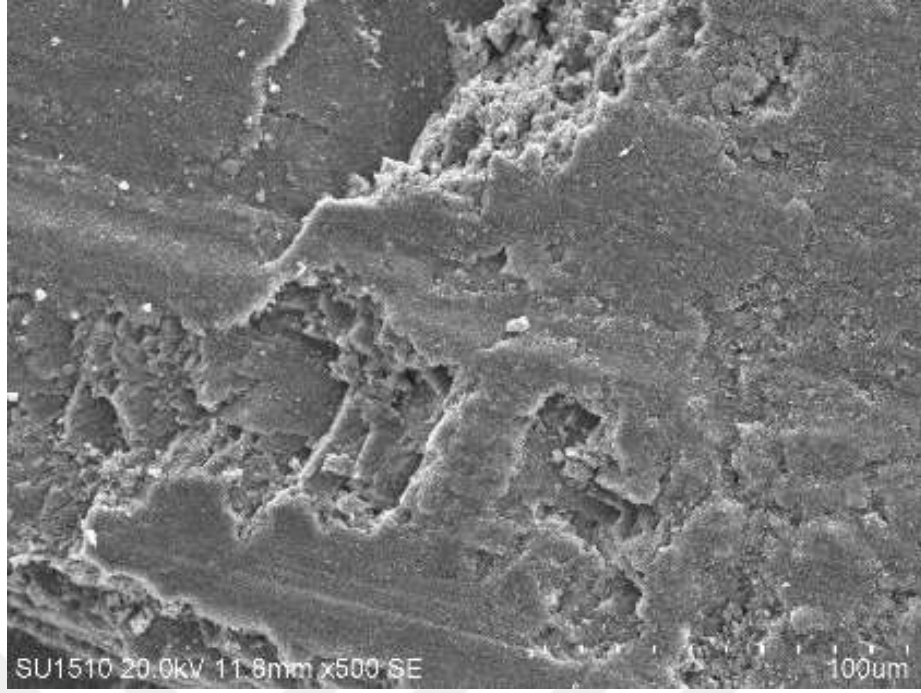
%1 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin 3 farklı noktasında ortalama %0,44 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

### C) %5 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T5) mikroyapısı

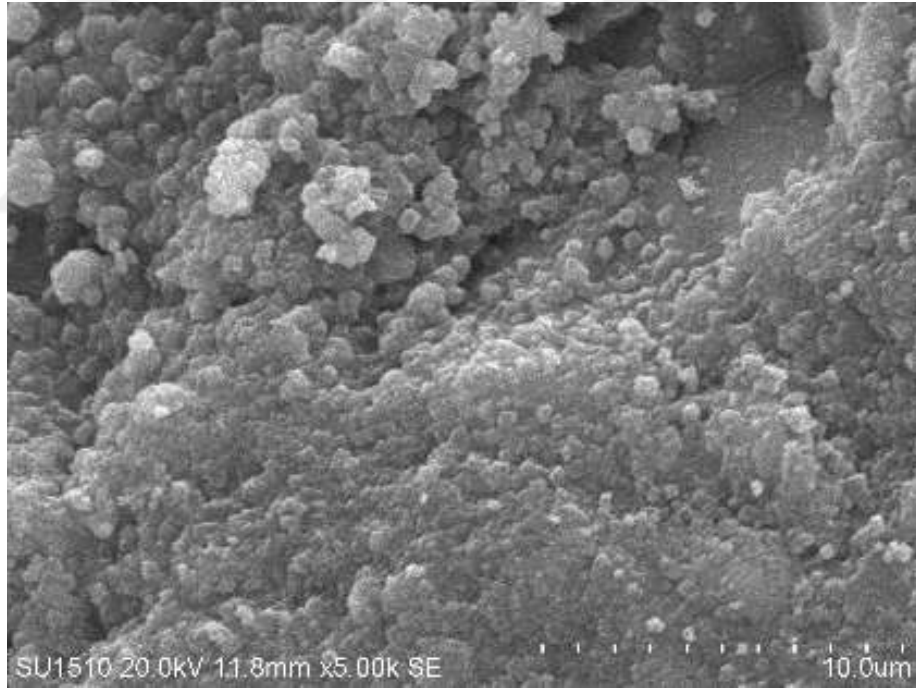
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.23'te gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



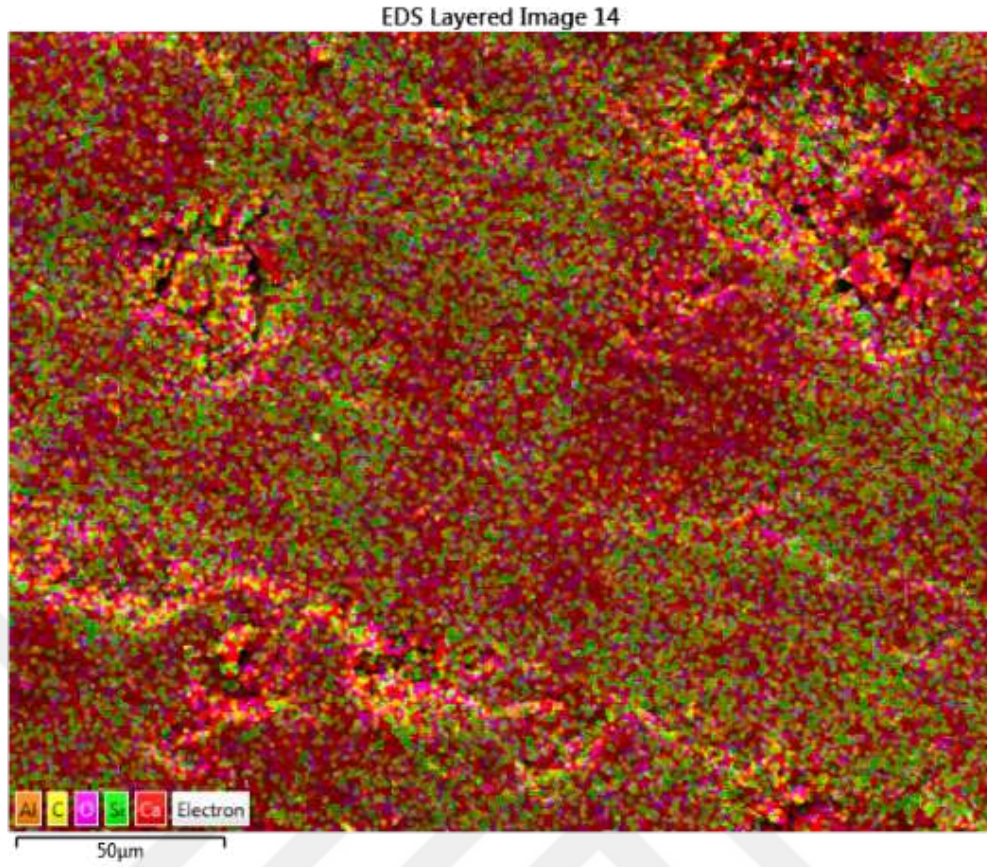
b. 500 kat büyütme



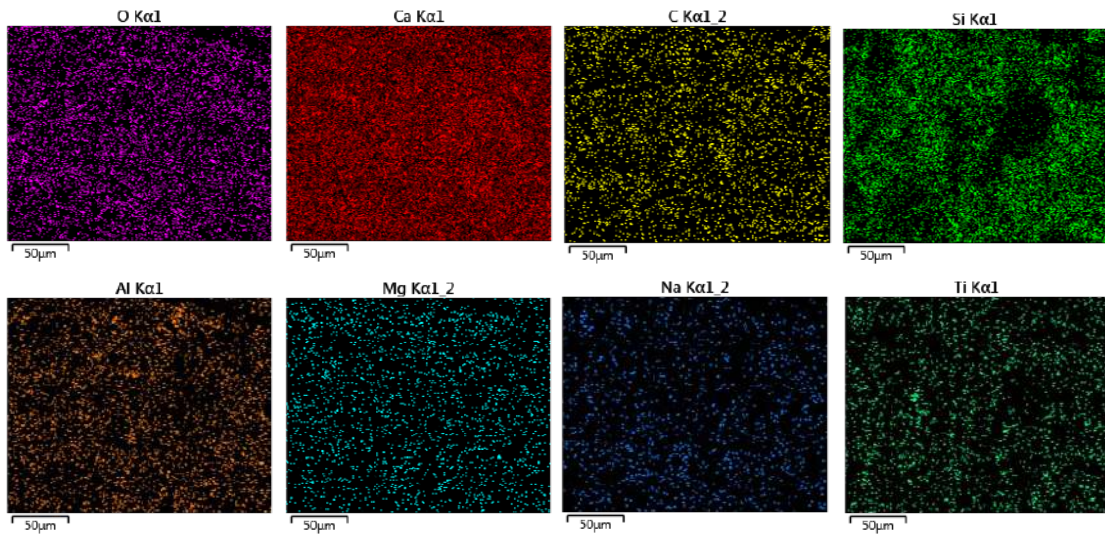
c. 5000 kat büyütme

**Şekil 4.23.** “T5” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.24’te, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.25’te gösterilmektedir.



Şekil 4.24. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.25. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.22'de paylaşılmıştır.

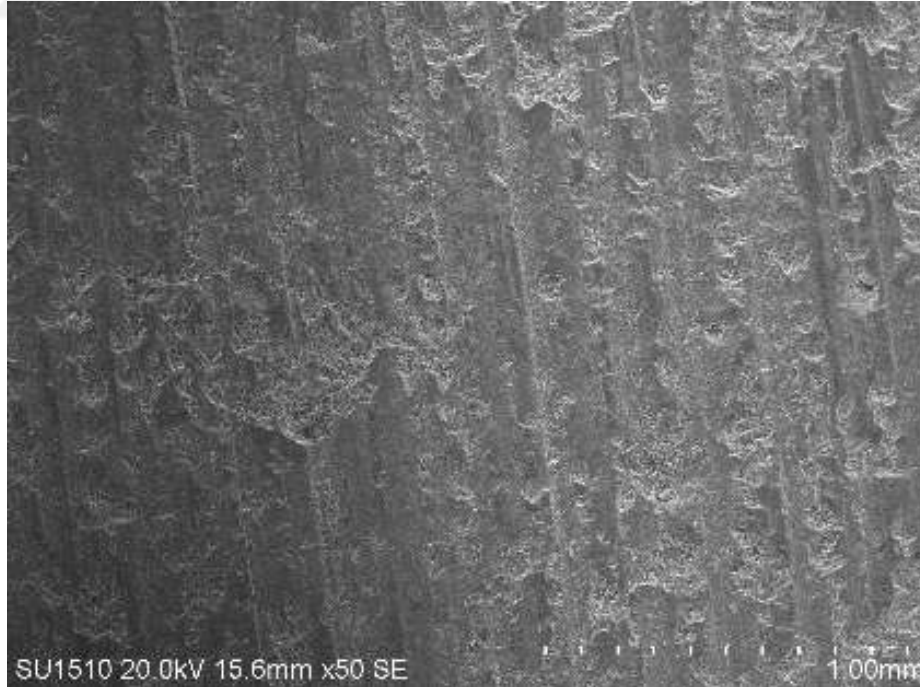
**Tablo 4.22.** 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (T5)

%5 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune (T5)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	47,31 (±2,762)
Kalsiyum (Ca)	31,20 (±2,410)
Karbon (C)	16,66 (±2,750)
Silisyum (Si)	2,18 (±2,310)
Alüminyum (Al)	0,60 (±0,581)
Magnezyum (Mg)	0,63 (±0,137)
Sodyum (Na)	0,17 (±0,140)
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>1,25 (±0,305)</b>

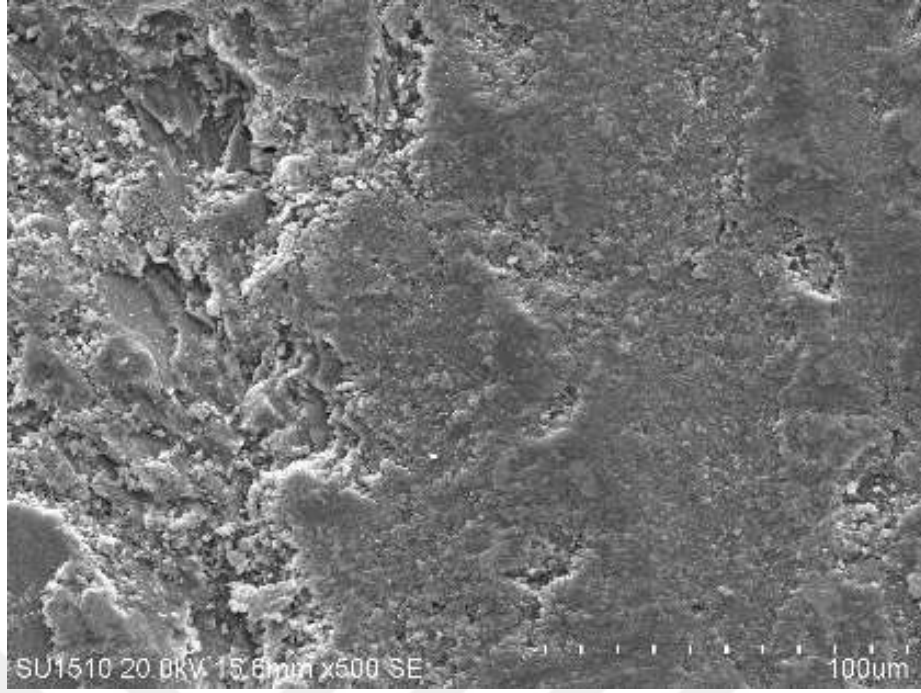
%5 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin 3 farklı noktasında ortalama %1,25 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

#### D) %10 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T10) mikroyapısı

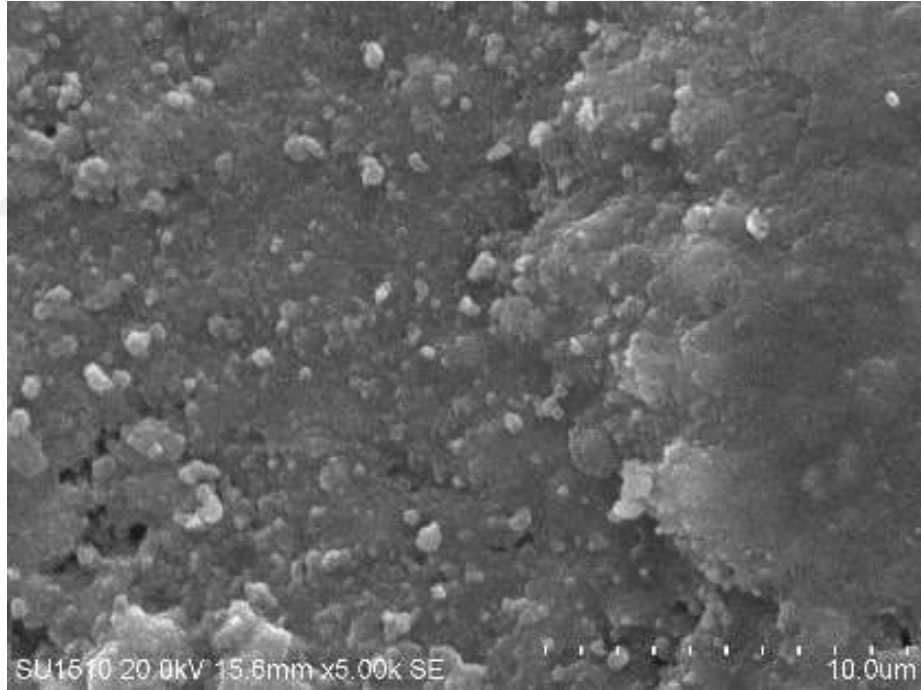
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.26'da gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



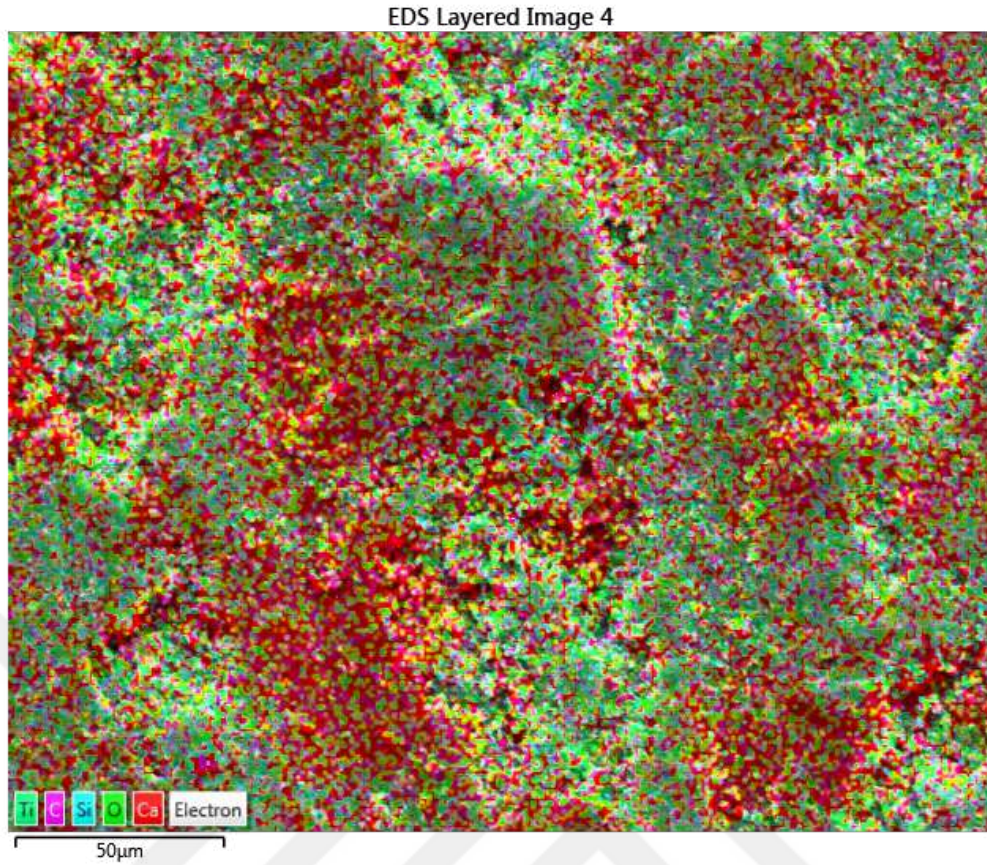
b. 500 kat büyütme



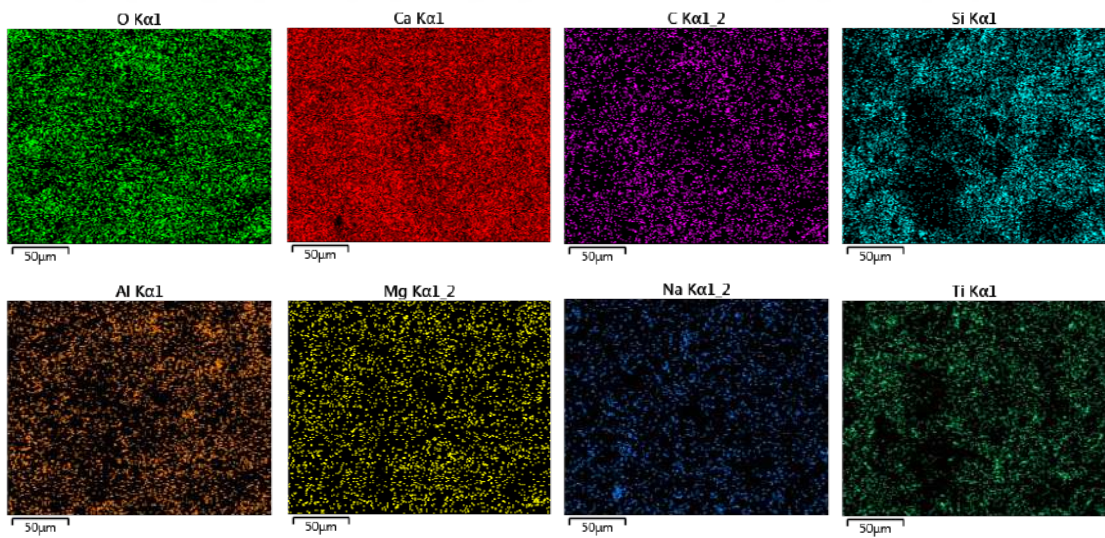
c. 5000 kat büyütme

**Şekil 4.26.** “T10” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.27’de, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.28’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.28. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.23'te paylaşılmıştır.

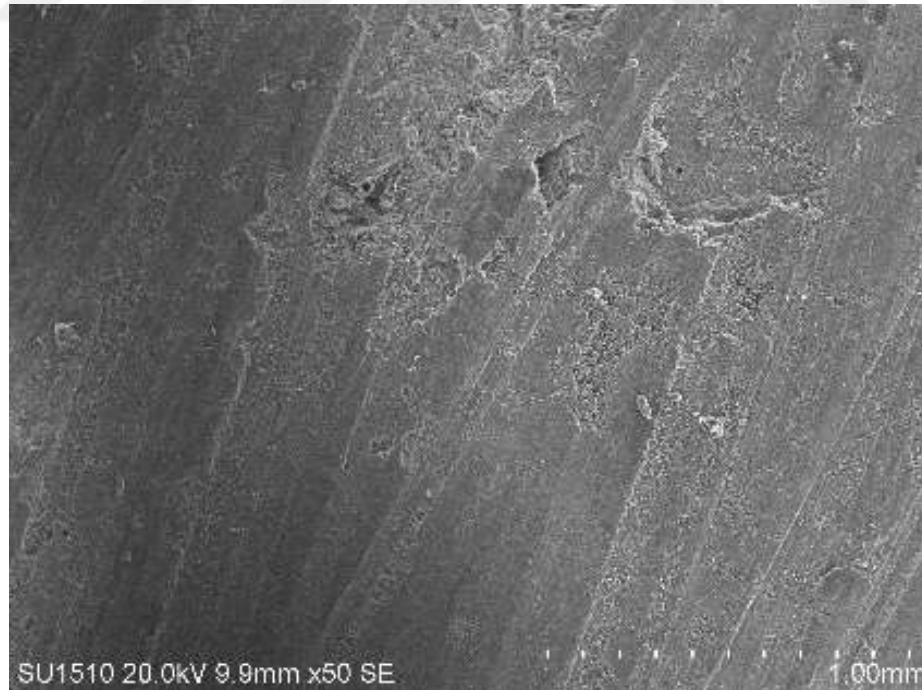
**Tablo 4.23.** 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (T10)

%10 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune (T10)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	51,37 (±0,974)
Kalsiyum (Ca)	26,52 (±1,937)
Karbon (C)	16,62 (±0,999)
Silisyum (Si)	2,58 (±1,144)
Alüminyum (Al)	0,63 (±0,295)
Magnezyum (Mg)	0,52 (±0,095)
Sodyum (Na)	0,06 (±0,110)
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>1,70 (±0,766)</b>

%10 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin 3 farklı noktasında ortalama %1,70 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

#### E) %20 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T20) mikroyapısı

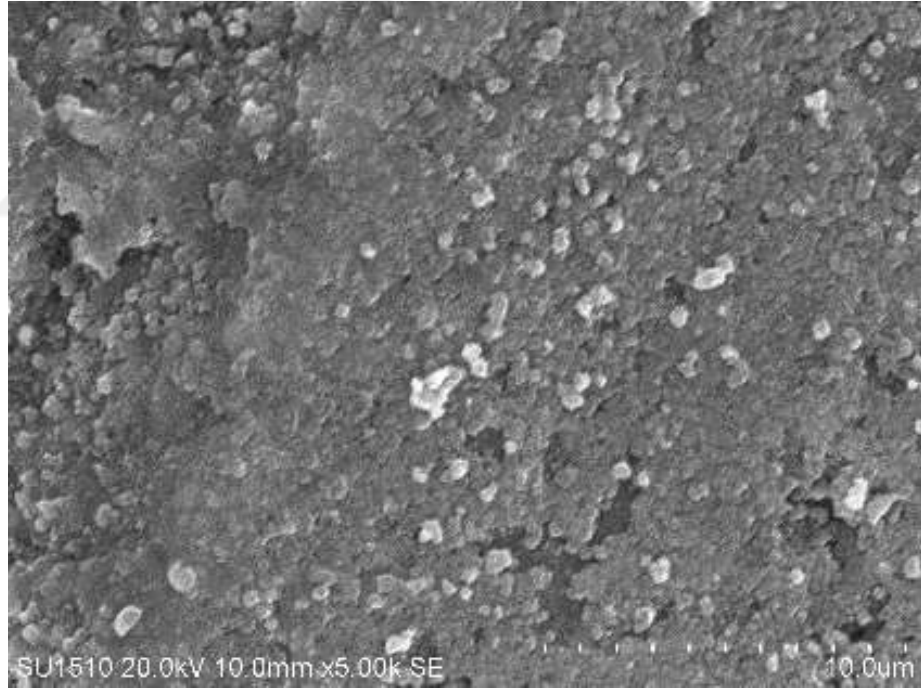
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



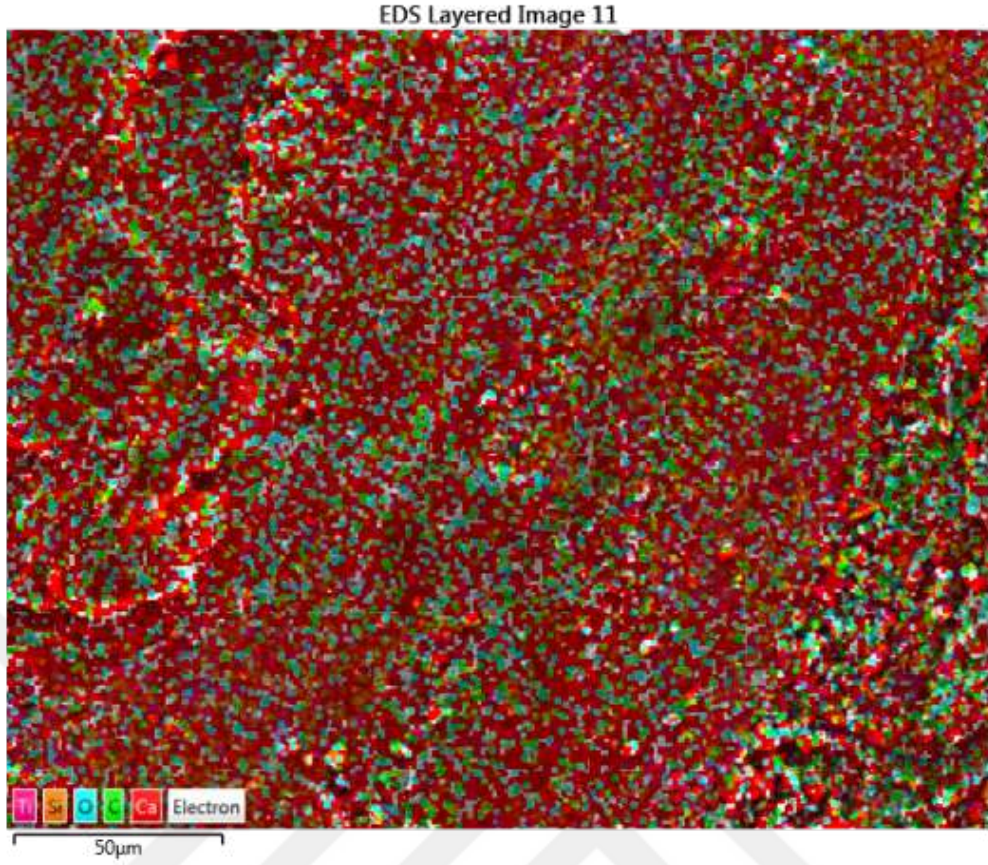
b. 500 kat büyütme



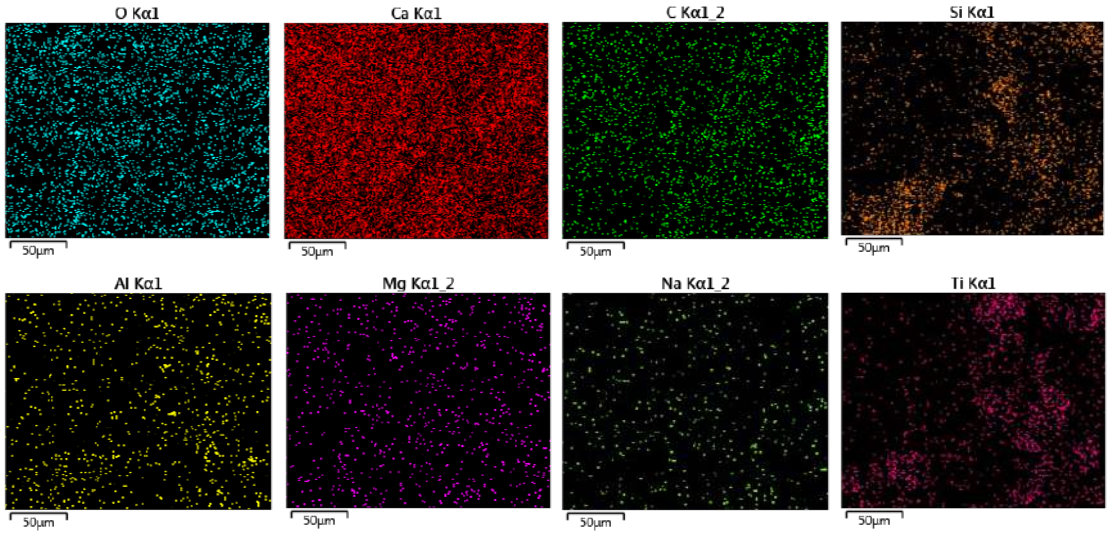
c. 5000 kat büyütme

**Şekil 4.29.** “T20” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.30’da, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.31’de gösterilmektedir.



Şekil 4.30. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.31. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.24'te paylaşılmıştır.

**Tablo 4.24.** 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (T20)

%20 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune (T20)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	45,74 (±1,077)
Kalsiyum (Ca)	24,76 (±1,372)
Karbon (C)	22,10 (±0,986)
Silisyum (Si)	2,50 (±0,830)
Alüminyum (Al)	0,60 (±0,172)
Magnezyum (Mg)	0,45 (±0,047)
Sodyum (Na)	0,25 (±0,234)
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>3,59 (±1,112)</b>

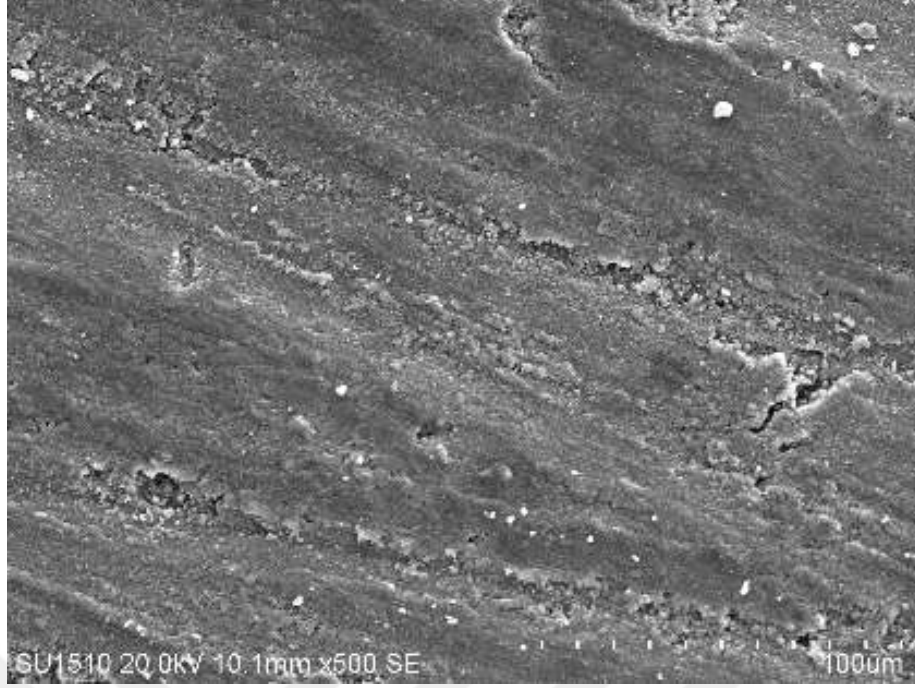
%20 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin 3 farklı noktasında ortalama %3,59 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

#### F) %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin (T50) mikroyapısı

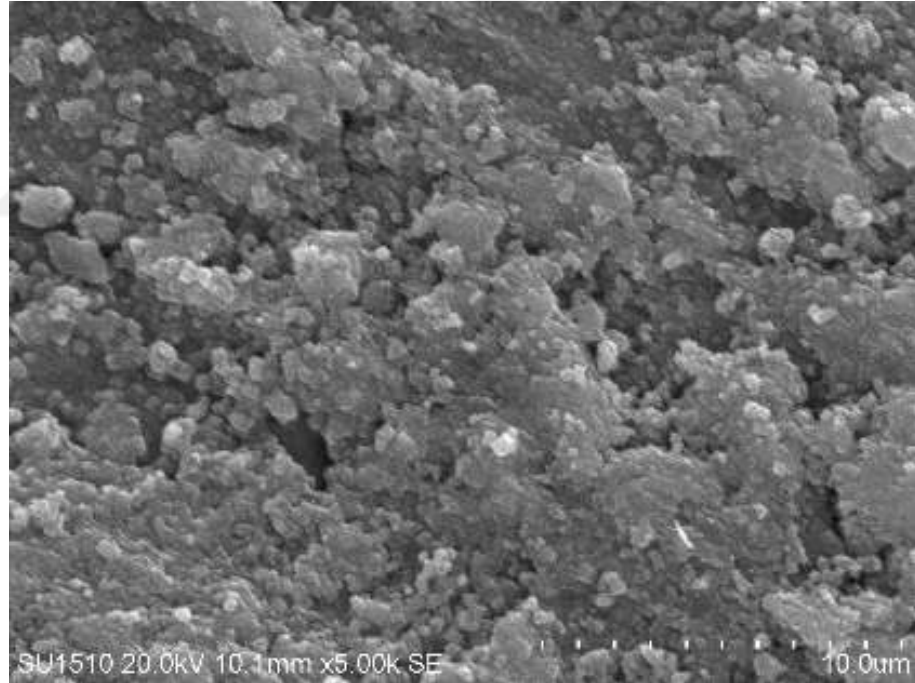
Numune üzerinde rastgele belirlenen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler Şekil 4.32'de gösterilmektedir.



a. 50 kat büyütme



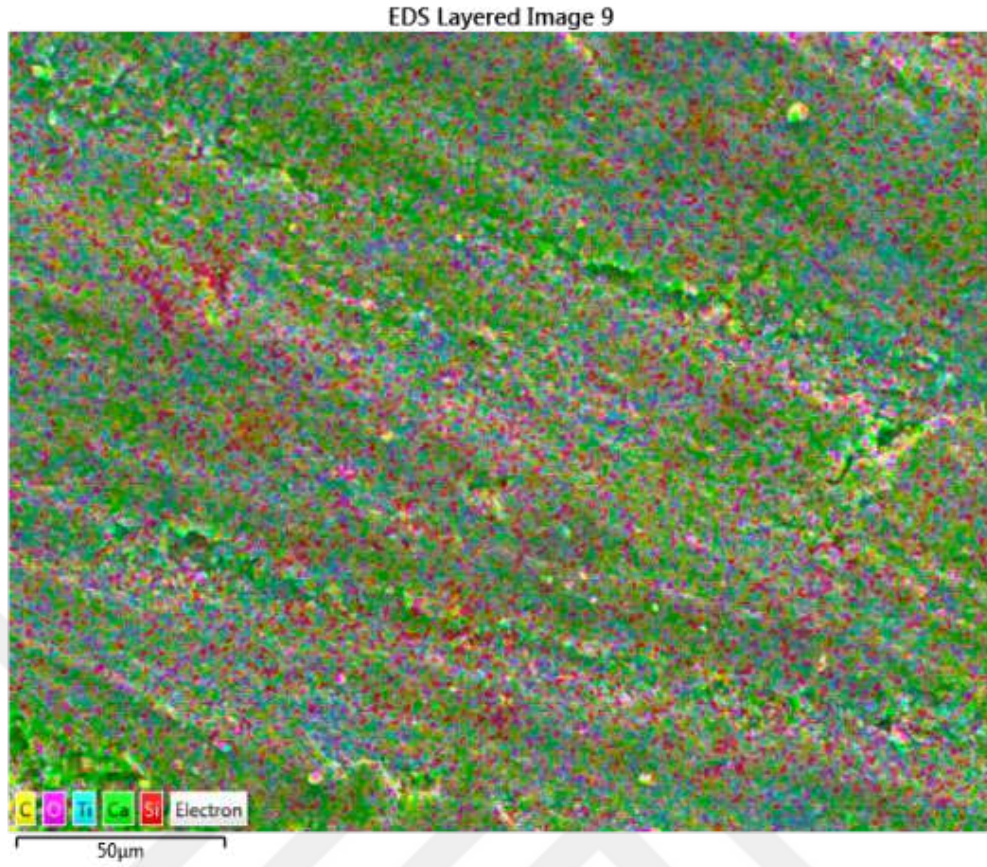
b. 500 kat büyütme



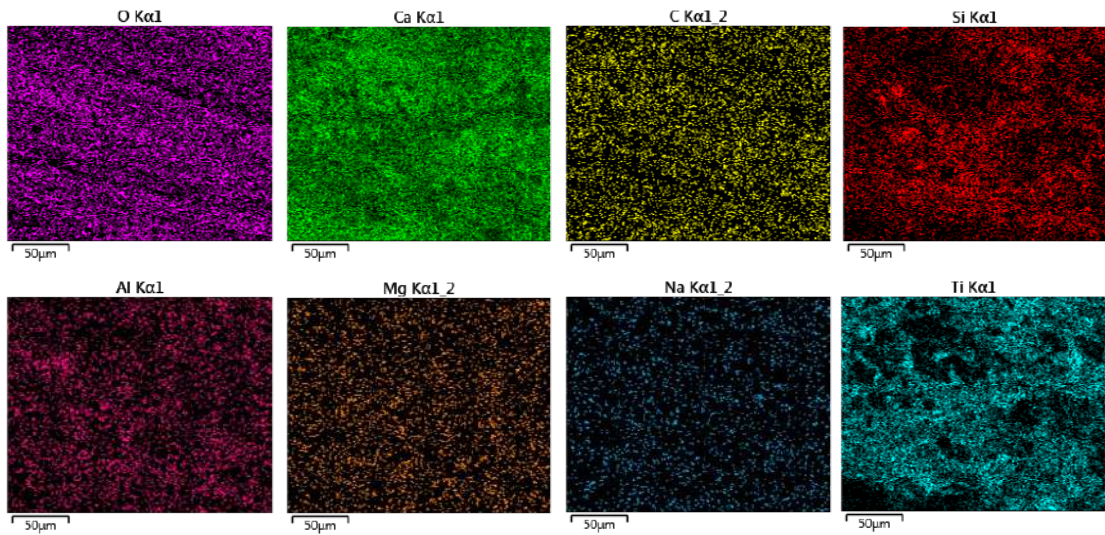
c. 5000 kat büyütme

**Şekil 4.32.** “T50” numunesinde seçilen bir noktanın 50, 500 ve 5000 kat büyütülmesiyle çekilen resimler

Herhangi bir noktanın 500 kat büyütülmesiyle elde edilen renkli harita Şekil 4.33’te, bu haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımları ise Şekil 4.34’te gösterilmektedir.



Şekil 4.33. 500 kat büyütülmüş noktanın renk haritası



Şekil 4.34. Haritadaki elementlerin renk skalasına göre bireysel dağılımı

Numunenin 3 farklı noktasındaki elementlerin ortalama dağılım oranları Tablo 4.25'te paylaşılmıştır.

**Tablo 4.25.** 3 noktadaki elementlerin ortalama dağılım oranları (T50)

%50 TiO <sub>2</sub> İçeren Numune (T50)	
Element	Ortalama Dağılım Oranı (%)
Oksijen (O)	<b>50,97</b> ( $\pm 0,841$ )
Kalsiyum (Ca)	<b>23,10</b> ( $\pm 3,756$ )
Karbon (C)	<b>15,73</b> ( $\pm 1,875$ )
Silisyum (Si)	<b>1,40</b> ( $\pm 0,904$ )
Alüminyum (Al)	<b>0,36</b> ( $\pm 0,206$ )
Magnezyum (Mg)	<b>0,32</b> ( $\pm 0,064$ )
Sodyum (Na)	<b>0,07</b> ( $\pm 0,015$ )
<b>Titanyum (Ti)</b>	<b>8,04</b> ( $\pm 5,300$ )

%50 TiO<sub>2</sub> içeren numunenin 3 farklı noktasında ortalama %8,04 oranında Titanyum (Ti) elementi tespit edilmiştir.

- **SEM analizinin genel değerlendirmesi**

6 farklı numuneden toplam 18 noktanın analiz edilmesi sonucu karışımların içerisindeki elementler ve bu elementlerin dağılım oranları ortaya çıkarılmıştır. Karışımlarda kullanılan titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) miktarı ile analize tabi tutulan noktadaki Titanyum (Ti) elementi dağılım oranlarının doğrusal olması beklenmektedir. TiO<sub>2</sub> miktarı fazla ise titanyum elementinin yüksek oranlarda dağılımında bulunması, TiO<sub>2</sub> miktarı az ise titanyum elementinin düşük oranlarda dağılımında yer alması gerekmektedir. Analiz sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, karışımlardaki TiO<sub>2</sub> miktarı ile titanyum elementinin dağılım oranlarının doğrusal olduğu görülmektedir. En yüksek dağılım oranı %8.04 ile karışımında %50 TiO<sub>2</sub> içeren numunede (T50), en düşük dağılım oranı ise %0,11 ile karışımında TiO<sub>2</sub> içermeyen referans numunede (R) olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak üretimi yapılan numunelerin homojenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 4.26).

**Tablo 4.26.** Titanyum (Ti) elementinin numuneler içerisindeki ortalama dağılım oranı

Numune türü	Titanyum (Ti) Elementi Ortalama Dağılım Oranı (%)
Referans numune (R)	0,11
%1 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T1)	0,44
%5 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T5)	1,25
%10 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T10)	1,70
%20 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T20)	3,59
%50 TiO <sub>2</sub> içeren numune (T50)	8,04

## 4.2. Tartışma

Bu bölümde yürütülen çalışmalar kapsamında elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanması ele alınmaktadır.

- Numune üretim aşamasında, karışımlarda kullanılan titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) miktarının artmasıyla malzemenin suya olan ihtiyacının arttığı tespit edilmiştir. Özellikle T50 numunelerinin kıvam alabilmesi için fazladan (~50 ml) su kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Malzemenin kalıplara yerleşmesi diğer numunelere kıyasla daha uzun sürmüş ve yerleşimin tam olarak sağlanması için daha fazla efor sarf edilmiştir. Karşımdaki çimento ve titanyum dioksitin ağırlıkça yarı yarıya yer değiştirmesinin malzeme işleme kolaylığı sağlamadığı düşünülmektedir.
- Numune üretim işleminin ardından karışımlardaki TiO<sub>2</sub> miktarının aynı hacme sahip malzemelerin kütlelerinde farklılıklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Referans numuneye kıyasla karışıma %10'a kadar TiO<sub>2</sub> ilavesinin malzeme kütlelerinde artışa, %20-50 oranlarında TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise malzeme kütlelerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Bu durum birkaç sebeple ilişkilendirilmektedir. Numune üretim aşamasında karışımlardaki TiO<sub>2</sub> miktarının artmasıyla malzemelerin daha zor işlendiği buna bağlı olarak kalıplara kolayca yerleşemediği tespit edilmiştir. Yerleşimi zor olan numunelerde gözenek miktarının artması ve numune içerisinde boşluklar kalması sebebiyle kütlelerinde azalma meydana geldiği tahmin edilmektedir. Karışıma %10'a kadar TiO<sub>2</sub> ilavesinin ise

malzemelerin daha yoğun bir mikroyapıya sahip olmalarını ve buna bağlı olarak da kütlelerinde artışa sebep olduğu düşünülmektedir.

- Numunelerin su emme katsayıları ile gözenek miktarı ilişkilendirilmektedir. Numunelerdeki su emme oranının artması gözenek miktarında da artış olması ve buna bağlı olarak dayanımın düşmesi olarak yorumlanmaktadır. Yapılan su emme deneylerinden elde edilen veriler incelendiğinde, referans numuneye ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar  $TiO_2$  eklenmesi sonucu numunelerin su emme katsayılarının düştüğü gözlemlenmiş ve buna bağlı olarak gözenek miktarında azalma meydana geldiği tahmin edilmektedir. %20 ve daha fazla  $TiO_2$  ilavesinin ise numunelerin su emme katsayılarında yükselmeye sebep olduğu ve buna bağlı olarak da gözenek miktarında artışa yol açtığı düşünülmektedir. Karışıma %5-10 aralığında  $TiO_2$  eklenmesiyle malzemelerin su emme katsayılarında %0,5-0,75 oranında azalma sağlanabileceği ortaya çıkarılmıştır. Nazari ve Riahi (2010) yürüttükleri çalışma kapsamında kendiliğinden yerleşen betonun içeriğine farklı oranlarda titanyum dioksit ekleyerek malzemenin su emme özelliğini incelemiştir. Çalışma sonunda çimento hamuruna ağırlıkça %4'e kadar  $TiO_2$  eklenmesinin malzemenin su geçirgenliğine karşı direncini artırdığı tespit etmiştir. Sopov ve ark. (2020) cam elyaf katkılı betona  $TiO_2$  ilave ederek malzemenin su emilim değerlerini tespit etmiştir. Çalışma sonunda, karışıma eklenen  $TiO_2$  sayesinde malzemenin su emiliminde %1 oranında azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir. Su emme deneyi kapsamında, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu düşünülmektedir.
- Birim hacim ağırlık değerleri numunelerin doluluk oranlarını (komposite) temsil etmektedir. Birim hacim ağırlık değeri ile hacimleri aynı olan numunelerin yoğunluk oranları yorumlanmaktadır. İlgili deney kapsamında, referans numuneye çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar  $TiO_2$  ilavesinin numunelerin birim hacim ağırlık değerlerini artırdığı, %20-50 arasında bir ilave durumunda ise numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinde düşüş yaşandığı ortaya çıkmıştır. Salemi ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada  $TiO_2$  içerikli betonu geleneksel beton karışımı ile kıyaslayarak malzemelerin fiziksel ve mekanik dayanımı üzerinde çıkarımlarda bulunmuştur. İçeriğinde %2 oranında  $TiO_2$  bulunan betonun geleneksel betona kıyasla daha yoğun bir yapıya sahip olduğu

tespit edilmiştir. Sopov ve ark. (2020) ise cam elyaf katkılı betona  $TiO_2$  ekleyerek malzemede daha yoğun bir yapının oluştuğunu belirtmiştir.

- Kılcal su emme katsayısı malzemelerin ısı yalıtım özellikleriyle ilişkilendirilmektedir. Akbulut (2018) yürüttüğü çalışma kapsamında farklı özelliklere sahip sıva numunelerini kılcallık deneyine tabi tutmuştur. Sonuç olarak, kılcal su emme katsayısının sıvadaki ısı yalıtım özelliklerinin sürdürülebilirliği ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Katsayının yükselmesi ile ısı yalıtım performansında azalma meydana geleceğine değinilmektedir. Yapılan kılcallık deneyinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek kılcal su emme katsayısının referans numunede olduğu,  $TiO_2$  içerikli numunelerin kılcal su emme katsayılarının ise referans numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak sıva karışımına  $TiO_2$  ilave edilmesiyle malzemenin ısı yalıtım performansının artırılacağı düşünülmektedir.
- Su buharı geçirgenliği malzemenin nefes alması olarak yorumlanmaktadır. Geçirgenlik ne kadar fazla ise numune içerisindeki yoğuşma riski o kadar az olacaktır. Yoğuşmanın fazla olması, malzeme bünyesinde su birikmesine, su ise zamanla küf ve mantar gibi yabancı maddelerin oluşmasına yol açacaktır. Yürütülen çalışmalar kapsamında, numunelerin birim su buharı geçirgenlik değerleri tespit edilmiştir. Referans numuneye çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %10'a kadar  $TiO_2$  ilavesinin numunelerin birim su buharı geçirgenlik değerlerini azalttığı, %20-50 arasında bir ilave durumunda ise numunelerin birim su buharı geçirgenlik değerlerinde artışa sebep olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan diğer deneylerden elde edilen sonuçlar da göz önüne alındığında, özellikle %20 oranında titanyum dioksit ilavesinin birim su buharı geçirgenliği kapsamında alınan en iyi sonuç olduğu düşünülmektedir.
- Eğilme dayanımı değeri, bir malzemenin bükülmeye karşı direnç eğilimi olarak hesaplanan yoğun bir özelliktir. Enine yük taşıyan elemanlar için eğilme dayanımı son derece önemli bir parametredir. Sıva gibi çoğunlukla düşey yüzeylere uygulanan malzemelerde yükün geleceği nokta baz alındığında eğilme dayanımının basınç dayanımına kıyasla daha önemli olduğu söylenmektedir. İlgili deney kapsamında, referans numuneye çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %20 oranında  $TiO_2$  ilavesinin 7. ve 28. Gün numunelerinin eğilme dayanımı performansını ciddi düzeyde artırdığı tespit edilmiştir. Karışıma %50 oranında  $TiO_2$  eklenmesi sonucunda ise numunelerin eğilme dayanımında gözle görülür bir

düşüş meydana gelmiştir. Genel olarak 7 günlük numunelerin 28 günlük numunelere kıyasla daha iyi eğilme dayanımı performansına sahip olması, numunelerin zamanla gevrek hale gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nazari ve Riahi (2011) yaptıkları çalışmada yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun karışımına  $TiO_2$  ekleyerek malzemenin eğilme dayanımını incelemiştir. %3'e kadar  $TiO_2$  kullanımının malzemenin eğilme mukavemetini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. %3'ten fazla  $TiO_2$  kullanıldığı takdirde karışımdaki  $Ca(OH)_2$  miktarının azaldığı ve nano parçacıkların uygun olmayan dağılımı sebebiyle eğilme mukavemetinde azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir.

- Basınç dayanımı, malzemenin üzerine gelen yüklere gösterdiği maksimum direnç olarak tanımlanmaktadır. Beton gibi düşey ekseninde yük taşıyan elemanlar için oldukça önemli bir özelliktir. Yürütülen çalışmalar kapsamında, üretimi yapılan sıva numuneleri basınç dayanımı deneyine de tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, 7 ve 28 günlük R, T1 ve T5 numuneleri benzer basınç dayanımı performansı gösterirken, 28 günlük T10 ve T20 numunelerinin basınç dayanımları 7 günlük numunelerine kıyasla ciddi bir artış göstermiştir. T50 numunelerinde ise yüksek seviyelerde basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. 7 ve 28 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı performansını 28 günlük referans numuneler göstermiştir. Bunun sebebinin karışım içerisindeki su/çimento oranıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Su/çimento oranının belli seviyelerde azalması numunelerin basınç dayanımı performansını olumsuz etkilemiştir. Çalışmalar kapsamında, don tesirine dayanım deneyinde kullanılan numuneler işlemlerin ardından basınç dayanımı testine de tabi tutulmuştur. Burada özellikle T5 numuneleri en iyi performansı gösterirken, T50 numunesi hariç diğer tüm numunelerin basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bu numunelerin 7 ve 28 günlük numunelerden yaklaşık 2 ay önce üretilmiş olması, don tesiri deneyi kapsamında düzenli olarak sıcak-soğuk uygulamasına tabi tutulmuş olması ve buna rağmen daha iyi basınç dayanımı performansı göstermesi sebebiyle, özellikle  $TiO_2$  içerikli numunelerde mekanik özelliklerin zamanla iyileştiği düşünülmektedir. Salemi ve ark. (2014) çimento ile titanyum dioksiti %2 oranında yer değiştirerek 28 günlük beton numunelerinin basınç dayanımlarında %22,71'e varan bir artış tespit etmiştir.

- Yapı malzemelerinde donma-çözülme etkisi altında hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar, malzeme yüzeyinin dökülmesi veya parça kopmasıyla oluşabileceği gibi, iç yapıda mikro çatlakların oluşması sonucu dayanımın azalması şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında, farklı içeriğe sahip sıva numunelerinin don tesirine karşı dayanımları tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, deney başlangıcından kısa bir süre sonra T50 numunesinin yüzeyinde kabarmalar meydana gelmiş ve zamanla dökülmeye başlamıştır. Deney sürecinin yarısında ise tamamen dağılmış bir numune halini almıştır. Diğer numunelerde donma-çözülme etkisine bağlı hasarlar gözlemlenmemiştir. T50 numunesinin dağılması birkaç sebeple ilişkilendirilmektedir. İlk sebep olarak; karışımdaki çimento miktarının yarı yarıya yer değiştirmesi sonucu malzeme içeriğinin bağlayıcılığı azalmış ve buna bağlı olarak numunenin bir süre sonra dağıldığı düşünülmektedir. İkinci sebep olarak; hali hazırda gözenekli bir yapıya sahip olan numunenin, deney süresi boyunca içerisindeki suyun donma-çözülme eylemleriyle hacminin artması ve buna bağlı olarak gözeneklerin genişlemesiyle başta çatlakların oluşmasına, sonrasında da numunenin dağılmasına sebep olduğu tahmin edilmektedir. Deney sonucunda, sıva karışımına %20'ye kadar  $TiO_2$  ilavesinin malzemenin don tesirine karşı dayanımında olumsuz etkiler oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Yürütülen deneysel çalışmalar sayesinde numunelere ait farklı özellikler ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen bulguların bir arada değerlendirilmesiyle her bir özellik için ideal numune tespit edilmiştir. İçeriğinde maksimum oranda  $TiO_2$  kullanımının sağlandığı, mevcut malzemeye kıyasla daha iyi fiziksel ve mekanik dayanımların elde edildiği numuneler Tablo 4.27'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.27.** Maksimum oranda  $TiO_2$  içeren ve mevcut malzemeye kıyasla daha iyi dayanım gösteren numuneler

Deneyle	Fiziksel Özellikler				Mekanik Özellikler		
	Su Emme Deneyleri	Birim Hacim Ağırlık Deneyi	Kılcallık (Kapilarite) Deneyi	Su Buharı Geçirgenliği Deneyi	Eğilme Dayanımı Deneyi	Basınç Dayanımı Deneyi	Don Tesirine Dayanım Deneyi
İdeal Numune	T10	T10	T20	T20	T20	T5	T20

Sıva karışımına  $TiO_2$  ilavesiyle mevcut malzemeye kıyasla daha iyi fiziksel ve mekanik dayanımların elde edilebileceği ortaya çıkarılmıştır. Yapıların dış cephesinde, düşey yüzeylere uygulanan sıva için özellikle eğilme dayanımı, don tesirine dayanım, ısı yalıtım performansı ile ilişkilendirilen kılcal su emme katsayısı ve su buharı geçirgenliği önemli parametrelerdir. %20 oranında  $TiO_2$  ilavesiyle özellikle bu dayanımlarda daha iyi sonuçların elde edilebileceği tespit edilmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi kapsamında geleneksel sıva karışımına 5 farklı oranda titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) ilave edilerek alternatif malzemelerin fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Standartlar doğrultusunda yürütülen çalışma sayesinde üretilen numunelerin 8 farklı deney yöntemi ile yapı malzemelerinde kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, geleneksel sıva karışımına ağırlıkça çimento ile yer değiştirme yöntemiyle %20 oranında  $TiO_2$  ilavesinin malzemenin birçok fiziksel ve mekanik dayanımlarında gelişme sağlayabileceği ortaya çıkarılmıştır. %20 oranında  $TiO_2$  ilavesi yönteminin çalışma kapsamında alınan en iyi sonuç olduğu ve ayrıca  $TiO_2$ 'nin sıva karışımında kullanılmasıyla aşağıda belirtilen kazanımların sağlanacağı tespit edilmiştir.

- $TiO_2$  nanopartiküllerinin yapı cephe kaplama malzemelerinde kullanılmasıyla hava kirliliğinin azaltılmasına ve malzeme yüzeylerinin daha uzun süre temiz kalmasına katkıda bulunduğu yapılan birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Geleneksel sıva karışımına %20 oranında  $TiO_2$  ilave edilmesiyle havadaki kirleticilerin filtrelenmesi sayesinde günümüz ve gelecek nesillerin daha sağlıklı alanlarda yaşamalarına olanak sağlayarak sürdürülebilirliğe katkıda bulunulacaktır. Ayrıca malzeme yüzeyinin daha uzun süre temiz kalması sayesinde bakım için harcanacak masraflar indirgenecektir.
- Çimentoların dünyadaki karbon salınımının %8'inden sorumlu olduğu söylenmektedir. Geleneksel sıva karışımına  $TiO_2$  ilave edilmesinin yanında bu ilavenin çimento ile yer değiştirilerek yapıyor olması, çimento tüketiminde azalmaya ve buna bağlı olarak da daha az seviyede karbon salınımının oluşmasını sağlayacaktır. Karışımın içerisindeki  $TiO_2$  havanın temizlenmesine olanak sağlarken, çimentoya olan ihtiyacın azalması sonucu var olan kirlilikte de azalma meydana gelecektir.
- Fiziksel ve mekanik özellikler, malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini tayin eden önemli parametrelerdir. Geleneksel sıva karışımına %20 oranında  $TiO_2$  ilave edilmesiyle malzemenin birçok fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sayede fiziksel ve mekanik dayanımı yüksek, servis ömrü uzun olan ve daha az bakım gerektiren alternatif yapı malzemeleri elde edilebilecektir.

Elde edilen bulgular kapsamında fiziksel ve mekanik özellikler bir arada incelendiğinde %10-20 aralığındaki TiO<sub>2</sub> karışımlarında daha iyi dayanımların ortaya çıkarılabileceği tahmin edilmektedir. Net optimum karışım oranının tespit edilebilmesi için %10-20 aralığının daha detaylı bir şekilde çalışılması önerilmektedir. Ayrıca TiO<sub>2</sub>'nin günümüz mimarisinde yapı cephe kaplama malzemesi olarak kullanılan diğer malzemelerdeki optimum karışım oranları da araştırılmalı ve benzer amaçlı kullanımı teşvik edilmelidir.



## KAYNAKLAR

- Acar, A. H. (2022). Nano Çimento Katkılı Fotokatalitik Prekast Cephe Elemanların Atmosferik Kirliliğe Etkisi-Ankara İl Örneği, Yüksek Lisans Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Konya.
- Akakuru, O. U., Iqbal, Z. M. ve Wu, A. (2020). TiO<sub>2</sub> Nanoparticles: Properties and Applications. *TiO<sub>2</sub> Nanoparticles*, 1-66.
- Akalın, K., Özmen, P., Tiftikçi, C., Canbaz, M., Bilgiç, Ş. ve Kara, Ç. (2015). Beton Kaldırım Taşları ve Yol Kaplama Yüzeylerinde Meydana Gelen Kirliliklerin UV Güneş Işıkları İle Temizlenmesi. *Electronic Journal Of Occupational Improvement And Research*, 150-161.
- Akbari, H. ve Berdahl, P. (2008). Evaluation of Titanium Dioxide as a Photocatalyst for Removing Air Pollutants. *California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program. CEC-500-2007-112*.
- Akpan, U. G. ve Hameed, B. H. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 520-529.
- ArchDaily. (2015). Vanke Pavilion - Milan Expo 2015 / Studio Libeskind (Online). Web adresi: <https://www.archdaily.com/627994/vanke-pavilion-milan-expo-2015-daniel-libeskind>
- Babadağ, Y. (2009). Kimyasal Katkıların Sıva Harçları Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Cardellicchio, L. (2019). Self-Cleaning and Colour-Preserving Efficiency of Photocatalytic Concrete: Case Study of the Jubilee Church in Rome. *Building Research & Information*, 48, 160-179.
- Carducci, A., Donzelli, G., Cioni, L., Palomba, G., Verani, M., Mascagni, G., ... Gelatti, U. (2017). Air Pollution: A Study of Citizen's Attitudes and Behaviors Using Different Information Sources. *Epidemiology Biostatistics and Public Health*, 14(2).
- Castillo, M. J., Martínez, S. M., Sosa, A. ve García-Luna Romero, A. C. (2022). Prosolve370e on Architectural Skins. *SHS Web of Conferences*, 139.
- Chen, J. ve Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899-1906.
- CNN. (2015). The smog-guzzling buildings fighting deadly pollution (Online). Web adresi: <https://edition.cnn.com/2014/05/23/tech/innovation/the-smog-guzzling-buildings-pollution/index.html>
- Crispino, M. (2010). Innovative Photocatalytic Pavements. *International Sustainable Pavements Workshop*.

- Curcic, A. (2018). Photocatalytic Self-Cleaning Facades in Architectural Design. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 16(3), 425-436.
- Demir, G. (2011). Nano TiO<sub>2</sub> Fotokatalizörün İç ve Dış Cephe İnşaat Boyalarında Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.
- Dereli, M. (2004). Konutlarda Dış Sıva Hasarlarının Çözüm Yolları ve Alternatif Sıva Denemeleri (Konya Örneği), Yüksek Lisans Tezi. *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Konya.
- Dereli, M. (2019). Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Üretimine Yönelik Kırmızı Çamura Mikronize Edilmiş Piroklastik Kayaç İlavesinin Etkilerinin Analizi, Doktora Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Konya.
- Di Paola, A., Bellardita, M. ve Palmisano, L. (2013). Brookite, the Least Known TiO<sub>2</sub> Photocatalyst. *Catalysts*, 3(1), 36-73.
- Eddy, D. R., Permana, M. D., Sakti, L. K., Sheha, G. A. N., Solihudin, G. A. N., Hidayat, S., ... Rahayu, I. (2023). Heterophase Polymorph of TiO<sub>2</sub> (Anatase, Rutile, Brookite, TiO<sub>2</sub> (B)) for Efficient Photocatalyst: Fabrication and Activity. *Nanomaterials*, 13(4).
- Efcenet. (2015). Italian Pavilion – Expo Milano 2015, Italy (Online). Web adresi: <https://www.efcanet.org/projects/italian-pavilion-expo-milano-2015-italy>
- Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., Garcia-Tenorio, R. ve Vaca, F. (2014). A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment. *Materials Sciences and Applications*, 05(07), 441-458.
- Glassford, K. M. ve Chelikowsky, J. R. (1992). Structural and Electronic Properties of Titanium Dioxide. *Physical Review B*, 46(3), 1284-1298.
- Göçer, C. (2005). Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panellerinde Yüzey Özelliklerine Bağlı Atmosferik Kirlenme Etkisi. 2. *Ulusal Çatı & Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu*. İstanbul.
- Haider, A. J., Jameel, Z. N. ve Al-Hussaini, I. H. M. (2019). Review on: Titanium Dioxide Applications. *Energy Procedia*, 157, 17-29.
- Halilovic, M. (2017). Potential of Air Quality Improvements in Sarajevo Using Innovative Architecture Approach. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 5(2).
- Iaac Blog. (2020). Animated Systems // Hospital Manuel Gea Gonzalaz Facade (Online). Web adresi: <https://www.iaacblog.com/programs/computational-design-hospital-manuel-gea-gonzalez-facade/>

- Jafari, S., Mahyad, B., Hashemzadeh, H., Janfaza, S., Gholikhani, T. ve Tayebi, L. (2020). Biomedical Applications of TiO<sub>2</sub> Nanostructures: Recent Advances. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 3447-3470.
- Kandiel, T. A., Robben, L., Alkaim, A. ve Bahnemann, D. (2013). Brookite versus anatase TiO<sub>2</sub> photocatalysts: Phase transformations and photocatalytic activities. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 12(4), 602-609.
- Kapkaç, F. (2013). Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, 223-232.
- Karagüler, M. E. ve Yüksel, F. Ş. K. (2011). Kendi Kendini Temizleyen Betonlar. *Beton 2011 Kongresi Bildirileri*, 470-480.
- Kimyager. (2012). Fotokataliz (Online). Web adresi: <https://kimyasimya.blogspot.com/2012/10/fotokataliz.html>
- Maver, K., Arçon, I., Fanetti, M., Emin, S., Valant, M. ve Lavrenčič Štangar, U. (2021). Improved photocatalytic activity of anatase-rutile nanocomposites induced by low-temperature sol-gel Sn-modification of TiO<sub>2</sub>. *Catalysis Today*, 361, 124-129.
- Mccarroll, J. ve Bradley, W. (1966). Excess Mortality as an Indicator of Health Effects of Air Pollution. *Am. J. Public Health*, 56(11), 1933-1942.
- Moafaq Al-Zaidi, B. ve Sarkis Markaryan, A. (2020). Eating air pollution using building's façade technology. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(4), 2218-2231.
- Nosaka, Y. ve Nosaka, A. Y. (2016). Reconsideration of Intrinsic Band Alignments within Anatase and Rutile TiO<sub>2</sub>. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 7(3), 431-434.
- NTV. (2021). İstanbul'da hava kirliliğinin en büyük nedeni "trafik" (Online). Web adresi: <https://www.ntv.com.tr/turkiye/istanbulda-hava-kirliliginin-en-buyuk-nedeni-trafik,nusI4xvN0U-CE6hf09Ji-g>
- Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L. ve Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 762-765.
- Temiz Hava Hakkı Platformu. (2019). Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri - Kara Rapor.
- TS 699. (1987). Tabii yapı taşları-Muayene ve deney metotları. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.
- TS 1481. (1988). Sıva yapım kuralları-Bina dış yüzeylerinde kullanılan. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.
- TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.

- TS EN 1015-11. (2000). Kâgir harcı- Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.
- TS EN 1015-18. (2004). Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.
- TS EN 1015-19. (2000). Kâgir harcı – Deney metotları – Bölüm 19: Sertleşmiş sıva ve örgü harcının su buharı geçirimsizliği tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.
- Uğur, T. ve Güleç, A. (2016). Harç, Sıva ve Diğer Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 17, 77-91.
- Usta, S. (2012). Agregâ Granülometrisinin Beton Bileşimindeki Teorik Malzeme Miktarları ile Betonun Kompasite ve Porozite Değerleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 1-15.
- WA. (2015). Italy Pavilion At Expo Milano 2015 Gains Top Hits With Its Porous Facade (Online). Web adresi: <https://worldarchitecture.org/architecture-news/cczhp/italy-pavilion-at-expo-milano-2015-gains-top-hits-with-its-porous-facade.html>
- Wikimeadia. (2012). File: Dives in Misericordia - ph.2co - © Giuseppe Boni.jpg (Online). Web adresi: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dives\\_in\\_Misericordia\\_-\\_ph.2co\\_-\\_%C2%A9\\_Giuseppe\\_Boni.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dives_in_Misericordia_-_ph.2co_-_%C2%A9_Giuseppe_Boni.jpg)
- Yalçınkaya, Ç. (2024). Çimento - Ders Notu. *Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*.
- Yalçınkaya, Ç. (2024). Agregalar - Ders Notu. *Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*.
- Yeğınobalı, A. ve Ertün, T. (2011). Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*. Ankara.
- Yurddaşkal, M., Kartal, U. ve Doluel, E. C. (2019). Titanyum dioksit/indirgenmiş grafen oksit kompozitlerin üretimi ve fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 249-255.
- Zva Architects. Hospital Gea Gonzalez (Online). Web adresi: <https://www.zvaarchitects.com/hospitalario/hospital-gea-gonzalez>