



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANO ÇİMENTO KATKILI
FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE
ELEMENLARIN ATMOSFERİK KİRLİLİĞE
ETKİSİ-ANKARA İL ÖRNEĞİ**

Ayşegül Hacer ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşegül Hacer ACAR tarafından hazırlanan “Nano Çimento Katkılı Fotokatalitik Prekast Cephe Elemanların Atmosferik Kirliliğe Etkisi-Ankara İl Örneği” adlı tez çalışması 27/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ

Danışman

Prof. Dr. Mustafa TOSUN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ayşegül Hacer ACAR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO ÇİMENTO KATKILI FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE ELEMENLARIN ATMOSFERİK KİRLİLİĞE ETKİSİ-ANKARA İL ÖRNEĞİ

Ayşegül Hacer ACAR

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TOSUN

2022, 91 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mustafa TOSUN
Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ

İklim değişikliği, enerji kıtlığı, sera gazı emisyonları ve mega kentlerde yoğun etkisi görülen hava kirliliği gibi çevresel sorunların artması, mimarlık disiplini içerisinde de sürdürülebilir yeni teknolojilerin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu noktada en umut verici çözümlerden biri olan fotokatalizörlerin kullanımı gündeme gelmektedir. Fotokatalitik oksidasyon teknolojisi (PCO); fotokatalizörlerin yaygın atmosferik kirleticileri yapay veya doğal UV ışığı kullanmaları sonucu nötralle etmelerini sağlayan bir çeşit mekanizmadır. Fotokatalizör olarak titanyum dioksit (TiO_2) nano partiküllerin kullanımı ile kendi kendini temizleme ve hava temizleme özelliğine sahip yapı malzemeleri üretilmektedir. Kentsel alanlarda en yaygın kullanılan malzemelerden biri de çimento esaslı ürünlerdir ve fotokatalitik çimentolar hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir paya sahiptir. TiO_2 'nin çimento bileşimine dahil edilmesi ile kentsel alanlarda ve bina kabuklarında kullanımı sonucu, nüfus yoğunluğu olan ve trafik kaynaklı egzoz emisyonunun yüksek olduğu bölgelerde fotokataliz etkisinden söz edilebilir.

Araştırma kapsamında fotokatalitik çimentoların bina cephelerinde beton esaslı prekast elemanlarda kullanımı, avantajları, panellerin yüzey özelliklerine göre kirlenme durumu ve hava temizleme özellikleri incelenmiştir. Fotokatalitik beyaz çimentoların kullanımı ile aynı zamanda yapılarda soğutma enerjisinin ve ısı tutulumunun azaltılması mümkündür. Avrupa'da yaygın olarak kullanılan fotokatalitik prekast elemanların kent ölçeğinde kullanımı senaryosu ile mevcut emisyonun azaltımına ilişkin bir hesaplama yöntemi oluşturulmuştur. Ankara ili model olarak seçilmiş ve farklı kirletici kaynaklarına ait yıllık emisyon salınımları verilmiştir. Buradan hareketle yıllık yapılaşma alanına düşen NO_x emisyon salınımı ve Türkiye'deki prefabrikasyon oranına bağlı olarak azot oksitlerin (NO_x) yıllık yapılaşma alanına düşen fotokatalitik temizlenme miktarı bulunmuştur. Buna göre fotokatalitik etki oranı hesaplanmış ve Ankara ili için mevcut prekast elemanlarda fotokatalitik çimento kullanımı sonucu NO_x emisyonlarında %0.30 oranında azalma olabileceği ortaya koyulmuştur. Analizler değişkenlere bağlı olarak formüle edilmiştir. Böylelikle farklı il veya yapı alanlarında, prekast veya kullanılacak farklı malzemelerin oranına bağlı olarak fotokatalitik etki oranının belirlenebileceği bir tahmin yöntemi oluşturulmuştur. Fotokatalitik malzemelerin sürdürülebilir yeşil malzemelere bir alternatif olması ve mimarlık disiplini içerisindeki diğer çevreye duyarlı teknolojilerle bir arada kullanılması durumunda hava kirliliği ile mücadelede etkin bir araç olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotokataliz, Fotokatalitik çimento, Hava temizleme, Kendi kendini temizleme, Nano TiO_2 , Prekast.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF NANO CEMENT ADDED PHOTOCATALYTIC PRECAST FACADE ELEMENTS ON ATMOSPHERIC POLLUTION-ANKARA PROVINCIAL EXAMPLE

Ayşegül Hacer ACAR

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Architecture

Advisor: Prof. Dr. Mustafa TOSUN

2022, 91 Pages

Jury

Prof. Dr. Mustafa TOSUN
Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ

Increasing environmental problems such as climate change, energy shortages, greenhouse gas emissions and air pollution, which have an intense impact on megacities has made it necessary to use sustainable new technologies within the discipline of architecture. At this point, the use of photocatalysts, which is one of the most promising solutions, has come to the fore. Photocatalytic oxidation technology (PCO); It is a kind of mechanism that allows photocatalysts to neutralize common atmospheric pollutants by using artificial or natural UV light. By using titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles as photocatalyst, self-cleaning and air-cleaning building materials can be produced. One of the most widely used materials in urban areas is cement-based products and photocatalytic cements have an important share in improving air quality. As a result of the inclusion of TiO₂ in the cement composition and its use in urban areas and building envelopes, the photocatalysis effect can be mentioned in areas with high population density and high exhaust emissions from traffic.

Within the scope of the research, the usage of photocatalytic cements in concrete-based precast elements on building facades, their advantages, pollution status according to the surface properties of the panels and air cleaning properties were examined. With the use of photocatalytic white cements, it is also possible to reduce the cooling energy and heat retention in buildings. With the scenario of using photocatalytic precast elements, which are widely used in Europe, on an urban scale, a calculation method for the reduction of existing emissions has been created. Ankara province was chosen as a model and annual emissions of different pollutant sources were given. From this point of view, the amount of photocatalytic cleaning of nitrogen oxides (NO_x) per year depending on the annual construction area and the prefabrication rate in Turkey has been found. Accordingly, the photocatalytic effect ratio was calculated and it was revealed that there could be a 0.30% reduction in NO_x emissions as a result of the use of photocatalytic cement in the existing precast elements for Ankara. Analyzes were formulated depending on the variables. Thus, an estimation method has been established in which the rate of photocatalytic effect can be determined depending on the ratio of precast or different materials to be used in different provinces or construction areas. It is predicted that photocatalytic materials will be an effective tool in the fight against air pollution if they are an alternative to sustainable green materials and used together with other environmentally sensitive technologies in the discipline of architecture.

Keywords: Air purification, Nano TiO₂, Photocatalysis, Photocatalytic cement, Precast, Self cleaning.

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, destek ve yardımını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Tosun'a ve yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübelerinden faydalandığım, Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi'nin değerli hocalarına teşekkürlerimi sunarım.

Daima yanımda olan, beni her konuda destekleyen ve güvenen annem Perihan DOĞAN'a, babam Ekrem DOĞAN'a ve tüm bu süreçte beni motive eden, anlayışını esirgemeyen eşim Barış ACAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayşegül Hacer ACAR
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı..... | 2 |
| 1.2. Kaynak Araştırması | 3 |
| 1.3. Atmosferik Kirlilik | 7 |
| 1.3.1. Türkiye’de hava kirliliği | 9 |
| 2. NANO ÇİMENTO KATKILI FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE ELEMENLARI VE ÖZELLİKLERİ | 11 |
| 2.1. Fotokatalitik Nanomalzemeler ve Özellikleri..... | 11 |
| 2.1.1. Fotokatalitik nanomalzemelerin çalışma mekanizması | 12 |
| 2.1.2. Fotokatalitik nanomalzemelerde süperhidrofilisite | 13 |
| 2.1.3. Fotokatalitik nanomalzemelerin kullanım alanları | 15 |
| 2.1.4. Fotokatalitik çimentonun kentsel ölçekte kullanımı..... | 27 |
| 2.1.5. Fotokatalitik nanomalzemelerin kullanım zorlukları ve sınırlamalar..... | 29 |
| 2.2. Fotokatalitik Nano Çimentonun Beton Esaslı Prekast Elemanlarda Kullanımı .. | 29 |
| 2.2.1. Prekast elemanlara fotokatalitik özellik kazandırılması | 30 |
| 2.2.2. Fotokatalitik prekast elemanların özellikleri ve teknik avantajları..... | 32 |
| 2.2.3. Fotokatalitik çimentonun verimliliğini etkileyen faktörler..... | 36 |
| 2.2.4. Avrupa’da fotokatalitik prekast eleman kullanımı | 49 |
| 2.2.5. Türkiye’de fotokatalitik prekast eleman kullanımı..... | 57 |
| 3. FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE ELEMENLARIN ATMOSFERİK KİRLİLİĞE ETKİSİ- ANKARA İL ÖRNEĞİ..... | 60 |
| 3.1. Ankara İli Hava Kalitesi | 61 |
| 3.2. Ankara İli Emisyon Envanteri | 63 |
| 3.3. Ankara İli Mevcut Prekast Uygulamalarında Fotokatalitik Malzeme Kullanımı | 69 |
| 3.3.1. Prefabrik yapı ve cephe alanının hesaplanması | 69 |
| 3.3.2. Fotokatalitik betonun NO _x temizleme miktarının bulunması | 71 |
| 3.3.3. Yıllık NO _x emisyon azaltımına ilişkin sonuçlar..... | 74 |
| 3.3.4. Birim alandaki fotokatalitik etkinliğin hesaplanması | 75 |
| 3.4. Fotokatalitik Etki Oranı Tahmin Yöntemi..... | 75 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5. Prefabrikasyonda Avrupa Standartlarına Göre Fotokatalitik Malzeme Kullanımı | 77 |
| 4. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 78 |
| KAYNAKLAR | 81 |



SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| AB | : Avrupa Birliği |
| Ca(OH) ₂ | : Kalsiyum Hidroksit |
| CO | : Karbonmonoksit |
| CO ₂ | : Karbondioksit |
| C-S-H | : Kalsiyum-Silikat-Hidrat |
| °C | : Derece Santigrat (Celsius) |
| ÇED | : Çevre Durum Raporu |
| DSÖ | : Dünya Sağlık Örgütü |
| ECO2 | : Energy Conscious Consumers |
| EMEP/EEA | : European Monitoring and Evaluation Programme / European Environment Agency |
| Gg | : Gigagram |
| g/m ² /h | : Gram/metrekare/saat |
| g/m ² /y | : Gram/metrekare/yıl |
| g/y | : Gram/yıl |
| g | : Gram |
| HKI | : Hava Kalite İndeksi |
| HNO ₃ | : Nitrik Asit |
| H ₂ O | : Dihidrojen Monoksit |
| H ₂ O ₂ | : Hidrojen Peroksit |
| H ₂ SO ₄ | : Sülfürik Asit |
| İMSAD | : İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği |
| LEED | : Leadership in Energy and Environmental Design |
| LOP | : Elastisite Sınırı (Limit of Proportionality) |
| m | : Metre |
| m ² | : Metrekare |
| mg | : Miligram |
| mg/m ² /h | : Miligram/metrekare/saat |
| mg/s/m | : Miligram/saniye/metre |
| µg | : Mikrogram |
| MOR | : Kopma Modülü (Modulus of Rupture) |
| NH ₃ | : Amonyak |
| NH ₄ ⁺ | : Amonyum |
| NM VOC | : Metan İçermeyen Uçucu Organik Bileşikler |
| NO | : Azot Monoksit |
| NO ₂ | : Azot Dioksit |
| NO _x | : NO + NO ₂ |
| O ₃ | : Ozon |
| OH | : Hidroksil |
| OSB | : Organize Sanayi Bölgesi |
| PCO | : Fotokatalitik Oksidasyon (Photocatalytic Oxidation) |
| PDMS | : Polidimetilsiloksan |
| PICADA | : Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment |
| PM | : Partikül Madde |
| PM 2.5 | : İnce Partikül |

| | |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| PM10 | : Kaba Partikül |
| PVC | : Polivinilklorür |
| RUB | : Residuum Upgrade Project |
| SO ₂ | : Kükürt Dioksit |
| SO ₃ | : Kükürt Trioksit |
| THEP | : Temiz Hava Eylem Planı |
| TiO ₂ | : Titanyum Dioksit |
| TiO ₂ -Pt | : Titanyum Dioksit-Platin |
| TÜİK | : Türkiye İstatistik Kurumu |
| UV | : Ultraviyole |
| VOC | : Uçucu Organik Bileşikler |
| WHO | : Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization) |
| W/m ² | : Watt/metrekare |
| ZnO | : Çinko Oksit |



1. GİRİŞ

Nüfus yoğunluğu fazla olan mega kentlerde hızlı ve düzensiz kentleşme, sanayileşme, enerji tüketimi, araç yoğunluğu gibi insan faaliyetlerinden kaynaklı sebepler sonucunda sera gazı emisyonları artmakta, kentsel hava kalitesi küresel bir endişe kaynağı haline gelmektedir. Birleşmiş Milletler (BM) Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi'nin Raporu'na göre dünya nüfusunun %55'i kentlerde yaşamakta ve 2050'ye kadar bu oranın % 66 ya çıkması beklenmektedir. Bu demografik artışa bağlı olarak kentlerde ulaşım, sanayi ve enerji sektörleri başta olmak üzere 2018 yılı küresel enerji talebinin %80'i fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır (Yılmaz, 2020). 2021 yılına ait Dünya Hava Kirliliği Raporu'na göre dünyadaki kentlerin %97'si DSÖ'ye ait hava kalitesini belirleyen standartları karşılamamaktadır (Temizhavahakkı, 2022).

Türkiye'de hava kirliliği sorunu 1950'lerden sonra hızlı kentleşme ve sanayinin gelişmesi ile birlikte ortaya çıkmış; öncelikle İstanbul, Ankara gibi büyük şehirlerde etkisini göstermiştir. Doğal gazın yaygın olarak evsel ısınmada kullanılmaya başlanmasıyla partikül madde ve kükürt dioksit seviyelerinde azalmalar olmuştur fakat hala kış aylarında artan kirliliğin önüne geçilebilmiş değildir. Aynı zamanda azot oksitlerin en büyük kaynağı olan egzoz emisyonları her sene artan trafik yoğunluğuna paralel olarak artma eğilimindedir.

Kirletici kaynağının doğrudan engellenemediği durumlarda her sektör kendi içinde ek aktif ve pasif önlemler almalıdır. Çevresel sorunlar mimarlık disiplini içerisinde sürdürülebilir geleneksel yöntem ve malzemelerle birlikte yenilikçi teknolojilerin kullanılmasını da gerekli kılmaktadır. Kaynak tüketimine dayalı, doğal kaynaklara zarar veren, içe dönük binalar yerine doğayla ilişki kurabilen, çevresel hassasiyetlere ve endişelere cevap verebilen, sorunların çözümüne katkıda bulunan mimari yapılar tasarlanmalıdır. Yeşil çatı ve dikey bahçe uygulamaları, doğru ısı yalıtım uygulamaları, doğal havalandırma sistemleri ve enerji tasarruflu bina tasarımları hava kirliliğinin azaltılması amacını taşıyan yaklaşımlardan bazılarıdır.

Bina zarfları çevreyle dengeli ilişki kurulması noktasında önemli rol üstlenirler. Fakat çevreye duyarlı yapı kabukları için mevcut yaklaşımlar ekolojik mimari içerisinde yer bulan yeşil alanlar düzeyinde kalmıştır. Hava kalitesinin iyileştirilmesine büyük katkılar sağlamakla birlikte sürekli bakım ihtiyacı olması yaygın kullanımındaki engellerden biridir. Buna karşın hava kalitesinin pasif olarak iyileştirilmesi için bakım

ve uygulama kolaylığı olan alternatif yapı malzemeleri önerilebilir. Geri dönüştürülebilir, toksik olmayan, üretim aşamasından kullanım aşamasına kadar enerji tüketimi dengeli olan sürdürülebilir malzemelerin kullanımı ile çevreye duyarlı mimari oluşumlar sağlamak mümkündür. Bu noktada fotokatalitik yapı malzemelerinin kentsel alanlarda ve bina kabuklarında kullanımı ile hava kirliliği artışının önüne geçilebileceği öne sürülmektedir.

Nanoteknoloji sayesinde malzemelere farklı karakteristik özellikler kazandırmak mümkündür. Titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerinin fotokatalizör olarak yapı malzemelerine entegre edilmesi ile ışık gibi doğal kaynakları kullanarak atmosferik kirlenmelerin parçalanması, yüzeylerin kendi kendini temiz tutabilmesi, temizlik ve bakım gerektirmemesi fotokatalitik malzemeleri öne çıkarır (Sakthivel, 2019). Fotokatalizörlerin birçok yapı malzemesiyle birlikte kullanımı mümkün olmakla birlikte modern kent dokusunda en büyük etkiye sahip betonun işlevselleştirilmesi, karakterizasyonu ve özelliklerinin geliştirilmesi sonucu çevresel sürdürülebilirliğe fayda sağlama potansiyeli yüksektir (Shen ve ark., 2015). Fotokatalizörün çimento içeriğine karıştırılması, diğer yüzey kaplamalarına kıyasla çok daha sıkı bir şekilde malzemeye bağlanmasını ve fotokataliz özelliğinin uzun süre korunmasını sağlar (Shen ve ark., 2015). Kaplamalarda aşınma etkisi daha yüksektir ve 4-5 senede bir yenileme gerektirir. Mimari yapılarda cephe elamanı olarak prekast panellerde fotokatalitik çimento kullanımı ile akıllı bina kabukları oluşturmak mümkündür.

Literatürde fotokatalitik çimentoların kentsel alanlardaki etkinliğini görmek için yapılan saha testleri genel olarak yatay elemanlarla sınırlı kalmıştır. Türkiye’de henüz uygulama alanı dar olmakla birlikte fotokatalitik prekast elemanların kullanımına ilişkin çalışmalar oldukça sınırlıdır ve Avrupa’da ticari olarak yaygın kullanılmasına rağmen alan çalışması eksikliği mevcuttur. Emisyon azaltımına ilişkin deneyler ise çoğunlukla laboratuvar düzeyindedir. Bu noktada malzemenin potansiyelinin incelenmesine ve kentsel ölçekte kullanımı sonucu emisyon azaltımlarına ilişkin çalışmaların ortaya koyulmasına ihtiyaç vardır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapı kabuklarında oluşan kirlenmeler, özellikle kükürt dioksit (SO_2) ve azot dioksit (NO_2) emisyonlarının kullanılan malzemelerde ciddi yapısal hasarlara sebebiyet

vermesi ve binaların ömrünü kısaltması atmosferik kirliliğin mimari ve kültürel değeri olan yapılar için önemini göstermektedir.

Nüfus yoğunluğunun olduğu bölgelerde atmosferik kirlilik etkilerini azaltmak için yapı sektöründe nanoteknolojik yeniliklerin benimsenmesi gerekliliğini vurgulanmak, kendini ve havayı temizleme özelliğine sahip nano malzemeleri sürdürülebilir yapı malzemelerine ve yeşil bina tasarım elemanlarına bir alternatif olarak sunmak, fotokatalitik malzemelerin kullanım alanlarını incelemek, uzun yıllar kendini koruma özelliğine sahip fotokatalitik çimentonun kent ölçeğinde prekast elemanlarda kullanımı ile emisyon azaltma potansiyelini ortaya koymak ve bir yöntem geliştirmek bu çalışmanın amaçlarındandır.

Çalışma kapsamında, TiO_2 katkının çimentonun içeriğine karıştırılması ile birlikte hem kentsel ölçekte hem de prekast elemanlarla bina cephelerinde kullanımlarının olası etkileri üzerinde durulmuştur. Fotokatalitik prekast elemanların, yüzeylerini kendi kendine temiz tutma eğilimleri ve yüzeyle temas halinde olan zararlı kirlleticilerin bozunması ile hava kirliliğinin önlenmesinde nasıl bir rol üstlendikleri değerlendirilmiştir. Ankara il örneği üzerinde prekast elemanlarda TiO_2 katkılı çimento kullanım önerisi getirilmiş, buna göre prefabrikasyon oranı üzerinden yıllık inşaat alanına ait prekast alanlar hesaplanmış ve birim alana düşen NO_x bozunma miktarı üzerinden malzemenin yıllık inşaat alanına ait NO_x azaltımı bulunmuştur. Böylece şehir içindeki çeşitli kaynaklardan atmosfere salınan toplam NO_x emisyonlarının azaltılması üzerindeki pay hesaplanmıştır. Veriler TÜİK ve Ankara ili 2020-2024 Temiz Hava Eylem Planı içerisinden alınmıştır. Sonuç üzerinden değişkenlere bağlı olarak bir fotokatalitik etkinlik tahmin yöntemi oluşturulmuştur.

1.2. Kaynak Araştırması

Literatür taraması kapsamında hava kirliliğine çözüm olabilecek mimarlık disiplini içerisinde farklı alternatif uygulamalar araştırılmış ardından fotokatalitik malzemelerin atmosferik kirlleticileri indirgeme özelliği üzerine yapılan saha araştırmaları ve deneysel çalışmalar incelenmiştir.

- Demirci'nin (2019) çalışmasında hava kirliliğinin önüne geçebilmek için yeşil çatı uygulamaları önerilmiştir. Bu kapsamda yeşil çatıların yalıtım, havayı ve binayı serinletme, yağmur suyu toplama ve drene etme özellikleri başta olmak üzere

gürültünün önlenmesindeki olumlu etkileri, ekonomik ve sosyal faydaları incelenmiştir. Yeşil çatıların çevresel etkileri farklı yapı örnekleri üzerinden değerlendirilmiştir.

- Alkan'ın (2020) çalışmasında hava kirliliğinin ve karbon emisyonunun azaltılması, yoğun güneş ışınımının soğurularak yapı içerisinde ve çevresinin soğutulması, canlılar için gerekli olan minimum O₂ ihtiyacının karşılanması gibi amaçlarla mimari yapılarda dikey orman uygulaması önerilmiş, bu doğrultuda İtalya, Çin ve Türkiye'deki üç örnek mimari yapı üzerinden bu uygulamanın etkileri değerlendirilmiştir.
- Koçu ve Dereli'nin (2008) çalışmasında ısınma kaynaklı emisyon salınımı ve enerji tüketimi ile binalarda yapılan ısı yalıtımları arasındaki ilişki araştırılmış, Konya ili hava kalitesi üzerinden değerlendirilme yapılmıştır. Enerji ihtiyacı fazla olan doğru yalıtılmamış binaların fosil yakıtların da kullanımıyla hava kirliliğinin oluşumunda önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Yapı içerisinde güneş enerjisinden ve doğal aydınlatmadan daha çok faydalanılmasını sağlayacak sistemler düşünülmeli, enerji tasarruflu binalar tasarlanmalıdır.
- Sakthivel'in (2019) çalışmasında fotokatalitik malzeme kullanımı sonucu en yüksek verimliliğin sağlanması için belirli parametrelere bağlı olarak bir cephe elemanı tasarlanmıştır. Yaz aylarında paneldeki gölgelemeyi en aza indirmek, rüzgar hızını panel yüzeyinde farklı geometrilerin etkisiyle düşürebilmek ve panelin yüzey alanını artırarak UV ışınımına en yüksek seviyede maruz bırakmak için simülasyon araçları yardımıyla bir modül oluşturulmuş, bu modüller birleştirilerek panel haline getirilmiştir. Tasarımın Londra'da sokak kanyonlarında ve kentsel alanlarda kullanımı önerilmiştir. Londra'nın meteorolojik verilerine de dayanarak kışın %3.5 - %8.9 yazın %18 - %37.5 oranında kirleticilerin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Boonen ve Beeldens'in (2013) çalışmasında Belçika Antwerp kentinde bir anayolda yapılan saha testi incelenmiştir. Bölgede 10,000 m²'lik bir fotokatalitik kaldırım bloğu inşa edilmiştir. Düşük bağıl nem ve daha yüksek ışık yoğunluğu ile NO_x'in azaltılmasına yönelik verimliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Tekrarlanan ölçümlerde 5 yıldan fazla kullanımda malzemenin hala etkin olmasına rağmen yüzeyde nitrat birikmesinden dolayı veriminin düştüğü görülmüş ancak yüzey yıkanarak ilk verimin tekrar elde edilebileceği bildirilmiştir.

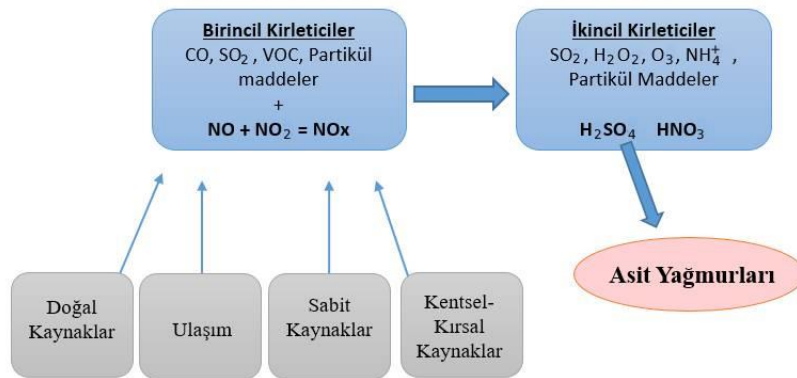
- Boonen ve Beeldens'in (2014) başka bir çalışmasında, sanayi bölgelerinde sera gazı emisyonunu azaltmak için hayata geçirilen ve Avrupa Birliği tarafından desteklenen ECO₂ sürdürülebilirlik projesi kapsamındaki saha çalışması incelenmiştir. 2010-2013 yılları arasında Belçika ve Hollanda'da yapılan çalışma kapsamında Antwerp yakınlarında Wijnegem'da ve Lier'da iki ayrı yolda, alt katman geri dönüştürülebilir agregalı beton, üst katman ise TiO₂ içeren fotokatalitik çimento olacak şekilde çift katmanlı beton kullanılmıştır. Sonuçlar bağıl nem arttıkça fotokatalitik etkinliğin azaldığı yönündedir. Yaşlanma ve trafik yoğunluğunun etkisi incelendiğinde uygulamadan 5 ay sonra kirletici temizlenme oranı %48 iken, 17 ay sonra %34'e indiği görülmüştür. Bu durum yüzeyde zamanla kir birikmesi ile açıklanmış fakat kirletici temizlenme oranı 2 yıl sonunda stabil hale gelmiştir.
- Sakthivel'in (2019) çalışmasında, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve fotokatalitik malzemelerin etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla Avrupa Birliği tarafından finanse edilen PICADA Projesi çerçevesinde yürütülen saha çalışmaları incelenmiştir. Bunlardan bir tanesi Fransa'nın Guerille kentinde kurulan üç adet pilot sokak kanyonuna aittir. Yüzeyinde TiO₂ katkı bulunmayan referans kanyon duvarları ve %3 TiO₂ katkılı çimento esaslı malzeme ile kaplanan kanyon duvarları karşılaştırılarak NO_x miktarları ölçülmüştür. Rüzgara bağlı olarak sağ duvarda referans kanyona göre %41.2 ile %82 arasında, sol duvarda ise referans kanyona göre %36.7 ile %75.1 arasında NO_x konsantrasyonunda azalma gözlemlenmiştir. İki duvar arasındaki kirletici konsantrasyonu farkı rüzgar yönü ve duvarın yöneliminden kaynaklanmaktadır.
- Ballari ve Brouwers'in (2013) çalışmasında Hollanda, Hengelo'da yapılan bir saha çalışması incelenmiştir. Bölgedeki caddenin bir bölümü (150 m) TiO₂ içeren çimentolu kaldırım taşıyla döşenmiş, bir bölümü (100 m) ise normal kaldırım taşıyla döşenmiştir. Bir yılı aşkın süre boyunca; trafik yoğunluğu, NO, NO₂ ve ozon konsantrasyonları, sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı, yönü ve UV ışınımı parametreleri ölçülerek düzenli aralıklarla izlenmiştir. NO_x konsantrasyonu, kaplama yapılan bölümde normal bölümden %19 (bütün gün dikkate alınarak) ve %28 (sadece öğleden sonraları dikkate alınarak) daha düşüktür. Yüksek UV ışınması ve düşük bağıl nem gibi ideal hava şartlarında ise NO_x konsantrasyonunda %45 oranında düşüş gözlemlenebilir.

- Guerrini'nin (2012) çalışmasında İtalcementi Group'un yürüttüğü bir saha testi incelenmiştir. İtalya'nın Roma kentindeki "Umberto I" tünelinin yenileme çalışmalarında, 9,000 m²'lik alanda fotokatalitik çimentolu bir boya uygulanarak kirleticilerin verimli bir şekilde azaltıldığını gözlemlenmiştir. Uygulama alanı, dış ortam koşulları dikkate alınarak düzenli aralıklarla izlendiğinde tünelin merkezinde ilk yapılan ölçümlere göre NO_x seviyesinde %20'lik azalma olduğu ortaya koyulmuştur. Fakat Roma şehrinin resmi istasyonlarında kayıtlı referans veriler dikkate alındığında %50'nin üzerinde bir azalma olmaktadır.
- İtalcementi Group'un (2022a) yaptığı bir saha çalışmasında TiO₂ içeren kilitli parke taşlarının etkisi incelenmiştir. 2003 yılında İtalya'nın Bergamo kentindeki bir sanayi bölgesinde, İtalcementi fabrikasının iç bahçesinin bir bölümünde 8,000 m²'nin üzerinde uygulama yapılmıştır. Normal asfalt alana göre NO_x konsantrasyonunda ortalama %45'lik bir azalma ölçülmüştür.
- Hassan ve ark.'nın (2012) TiO₂ kaplı asfalt kaplamaların fotokatalitik verimliliği üzerine yürüttükleri bir çalışmada, hazırlanan numunenin çevresel performansı, NO, NO₂, NO_x ve SO₂ kirleticileri dikkate alınarak laboratuvar ortamında ölçülmüştür. Laboratuvar değerlendirmesi, TiO₂'nin NO_x kirleticileri için %31-55 ve SO₂ kirleticileri için %4-20 arasında değişen bir verimle hava akımından NO_x ve SO_x'i uzaklaştırmada etkili olduğunu göstermiştir.
- İtalcementi Group'un (2008) Milano Segrate'de Via Morandi'de asfalt yolun bir bölümünde yaptığı deney, fotokatalitik çimento esaslı malzemelerin değerlendirilmesi için dünyadaki ilk ve en önemli saha deneyi olarak kabul edilmiştir. Yolun bir bölümüne TX Active çimento esaslı harç ince bir kaplama halinde uygulanmıştır ve dış ortam koşullarının değerlendirilmesi için Kasım 2002 ile Temmuz 2003 arasında bir dizi test yapılmıştır. Bu koşullara bağlı olarak NO azalmasının yolun uygulama yapılmamış kısmına kıyasla %60'a ulaşabileceği bulunmuştur. En iyi veriler, yaklaşık 90,000 Lux parlaklık, yaklaşık 0.7 m/s rüzgar hızı, 32 °C ortam sıcaklığı ve %46 nem ile yazın elde edilmiştir.
- Demeestere ve ark. (2008) çatı kiremitleri ve oluklu levhalarda TiO₂'nin toluen bozunmasına karşı laboratuvar ölçekli fotokatalitik aktivitesini araştırmıştır. Kirletici konsantrasyonu, bağıl nem ve kirletici akış hızının etkisinin araştırıldığı detaylı bir çalışma sonucunda %78'e varan toluen bozunma verimi elde edilmiştir.

- Maggos ve ark. (2007), TiO_2 içeren bir boyanın mevcut kirlilikten arındırma verimliliğini test etmek için kapalı bir otoparkın yapay olarak kapatılmış bir bölümünde NO ve NO_2 uzaklaştırılma testleri gerçekleştirmişlerdir. Otoparkın tavanı PICADA projesi çerçevesinde geliştirilen TiO_2 içerikli beyaz akrilik boya ile boyanmış ve kapalı alan test süresi içerisinde egzoz gazları ile beslenmiştir. Sonuçlar gerçek ölçekli bir alanda NO ve NO_2 'nin %19 ve % 20 oranında fotokatalitik bozunması ile ortamdan uzaklaştırıldığını göstermiştir.
- Sopov ve ark. (2020) cam elyaf katkılı beton ürünlerle hava kirleticilerin fotokatalitik olarak uzaklaştırılmasına yönelik laboratuvar ortamında deneysel bir çalışma yapmışlardır. 23 ± 2 °C sıcaklık, %50 bağıl nem ve $10 W/m^2$ ışık yoğunluğuna sahip ortam koşullarında, beton blok numunenin bulunduğu kapalı bir kap içerisine NO_x içeren hava üflenmiştir. Deney %34 ile %62 arasında değişen fotokatalitik etkinlikle sonuçlanmıştır ve TiO_2 tabakasının kalınlığı arttıkça NO_x azalma verimliliğinin yükseldiği görülmüştür.

1.3. Atmosferik Kirlilik

Çevrenin canlı ve cansız ögeleri üzerinde, fiziksel ve biyolojik olarak yapılarını olumsuz etkileyen maddelerin hava, su ve toprağa karışması sonucu oluşan kirliliğe çevre kirliliği adı verilir. Küresel ısınma, asit yağmurları gibi önemli çevresel sorunlara yol açan atmosferik kirleticiler ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; kaynaklardan doğrudan atmosfere yayılan birincil (primer) kirleticiler ve birincil kirleticilerin atmosferde bulunan diğer maddelerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu dolaylı olarak oluşan ikincil (sekonder) kirleticilerdir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Birincil ve ikincil kirleticilerin şematik olarak gösterimi

Atmosferik kirliliğin kaynakları ise yine iki şekilde incelenebilir.

1. Doğal kaynaklar: Orman yangınları, volkanik patlamalar, buharlaşma sonucu emisyon miktarının artması gibi etkilere sebep olan kaynaklardır.
2. Antropojenik kaynaklar: Araç emisyonu, ısınma ve sanayi kaynaklı kirlilik gibi insanların neden olduğu kaynaklardır.

Organik, inorganik ve çevresel kirleticiler Çizelge 1.1'deki gibi sınıflandırılabilir. Parçalanması zor olan organik kirleticiler ve ağır metal iyonları özellikle endüstriyel atıklarda bulunmakta ve kanserojen nitelik taşımaktadır. Bu tür ağır kirleticilerin temizlenmesi için geleneksel yöntemlerin yanı sıra yeni teknolojilerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Göçer, 2005; Gopalan ve ark.,2020).

Çevre sorunlarının ciddi seviyelerde baş göstermesinde en önemli etken sanayi devrimidir. Sanayileşme sürecinde yoğun enerji ihtiyacı sonucu hava kirliliği kritik seviyelere gelmiştir. Bu durum sonucunda Avrupa ülkeleri başta olmak üzere birçok ülke hava kirliliği ile mücadelede yasalaşma ve örgütlenme yoluna gitmiştir (Sümer, 2014).

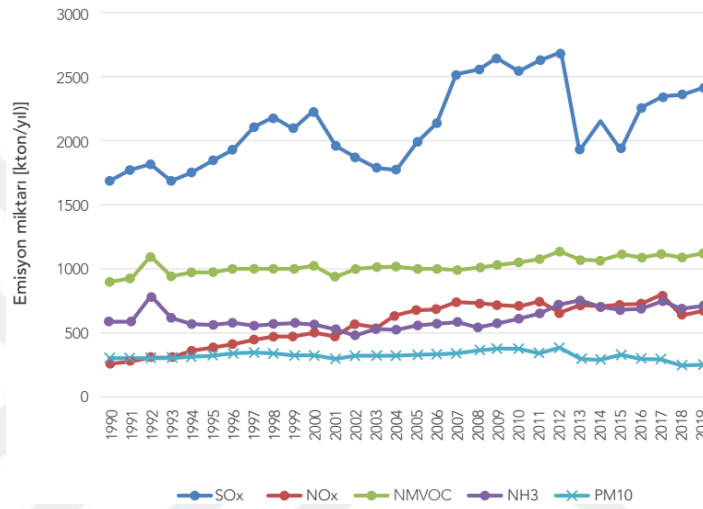
Çizelge 1.1. Kirleticilerin sınıflandırılması (İtalcementi Grup, 2020; Kuzmichev ve ark., 2020; Gopalan ve ark., 2020)

| Organik ve inorganik kirletici maddeler | Çevresel kirleticiler |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kurum, kir ve organik partiküller • Küf, mantar ve sporları • Yosun, bakteri ve alerjenler • Tütün dumanı ve lekeleri | <ul style="list-style-type: none"> • Azot Oksitler (NO_x) - asit yağmuru, yer seviyesindeki ozon(duman), belirli toksik kimyasallar ve su kalitesinin bozulmasında ana bileşen • Kükürt Oksitler (SO_x) -asit yağmuru, birçok zararlı sülfat ve diğer ürünlerin oluşumuna sebep olan bileşen. • Partikül Maddeler (PM2.5, PM10) • Uçucu Organik Bileşikler (VOC) - benzen ve tolüen gibi • Amonyak - NH₃ • Organik klorürler, aldehitler, polisiklik aromatikler |

Fosil yakıtların kullanımı sonucu oluşan hava kirliliği, yapılarda ve yapı malzemeleri üzerinde de olumsuz etkilere sebebiyet vermektedir. Bu etkilerin araştırılması ve önlenmesi için mimarlık disiplininin “Atmosferik Kirlilik” kavramını ele alması gerekmektedir (Ünverdi ve ark., 2016).

1.3.1. Türkiye’de hava kirliliği

Sanayileşmenin etkileri Batı’da endişe kaynağı haline geldiği ve bu konuda çalışmalar yapıldığı dönemde Türkiye’de hava kirliliği henüz kritik seviyelerde değildi. Fakat 1950’lerden sonra hızlı kentleşmenin ve sanayileşmenin etkisiyle başta İstanbul ve Ankara olmak üzere büyük şehirlerde çevre sorunları baş göstermeye başlamıştır (Sümer, 2014).



Şekil 1.2. 1990-2019 yılları arası emisyon miktarlarındaki değişim (IIR, 2021)

Türkiye 2021 Bilgilendirici Envanter Raporu’nda farklı kirleticilerin sektördeki birincil kaynağı ve değişimleri verilmiştir. Çizelge 1.2’ye göre kükürt dioksit (SO₂) emisyonları 1990-2019 yılları arasında %45 oranında artma eğilimi göstermiştir. SO₂ salınımı %66.3 oranında yanma faaliyetlerinden kaynaklanır. %12’lik pay ise konutların ısınma amaçlı yakıt tüketimine dayanır. Partikül madde (PM10) emisyonunun birincil kaynağı %67.5 pay ile gübre üretimi, ikincil kaynağı ise %16.9 pay ile konutlarda ısınma amaçlı yakıt tüketimidir. Amonyak (NH₃) salınımının esas kaynağı tarım ve hayvancılık, metan içermeyen uçucu organik bileşiklerin (NMVOC) ana kaynağı tarımsal faaliyetler, karbonmonoksit (CO) emisyon salınımları ise birincil olarak konutlarda ısınma sebeplidir. 1990-2019 arası emisyon miktarlarındaki değişimler ise Şekil 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Kirleticilerin 1990-2019 yılları arası artma ve azalma eğilimleri (IIR, 2021)

| Yıl | SO ₂ | NO _x | NMVOC | NH ₃ | CO | PM10 |
|------------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|------|------|
| Eğilim 1990-2019 | %45 | %205 | %26 | %31 | -%18 | -%9 |
| Eğilim 2018-2019 | -%2.5 | -%0.7 | %3 | %5 | %4.5 | %3 |

Bir bölgeye ait kirletici düzeylerinin toplum tarafından anlaşılması ve yöneticilerin toplum sağlığını korumak için gerekli önlemler almaları amacıyla hava kalitesini belirleyen bir aracın oluşturulması önemlidir. Hava kalitesinin, ülkelerin limit değerlerine göre sınıflandırıldığı indeks Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) olarak ifade edilir. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği gereğince oluşturulan ulusal hava kalitesi indeksi Çizelge 1.3'de verilmiştir. Limit değerlerin aşılması halinde özellikle hassas gruplar, çocuklar, solunum yolu rahatsızlığı ve kronik hastalıklara sahip kişilerde ciddi sağlık sorunları görülebilmektedir (Egethm, 2022).

Çizelge 1.3. 2019 yılı itibariyle geçerli olan hava kalitesi indeksi (HKİ)

| İndeks | HKİ | SO ₂ [µg/m ³] | NO ₂ [µg/m ³] | CO [µg/m ³] | O ₃ [µg/m ³] | PM10 [µg/m ³] |
|-----------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | 1 Sa. Ort. | 1 Sa. Ort. | 8 Sa. Ort. | 8 Sa. Ort. | 24 Sa. Ort. |
| İyi | 0 – 50 | 0-100 | 0-100 | 0-5.500 | 0-120 ^L | 0-50 |
| Orta | 51 – 100 | 101-250 | 101-200 | 5.501-10.000 | 121-160 | 51-100 |
| Hassas | 101 – 150 | 251-500 | 201-500 | 10.001-16.000 ^L | 161-180 ^B | 101-260 |
| Sağlıksız | 151 – 200 | 501-850 | 501-1.000 | 16.001-24.000 | 181-240 ^U | 261-400 |
| Kötü | 201 – 300 | 851-1.100 | 1.001-2.000 | 24.001-32.000 | 241-700 | 401-520 |
| Tehlikeli | 301 – 500 | >1.101 | >2.001 | >32.001 | >701 | >521 |

L: Limit Değer
B: Bilgi Eşiği
U: Uyarı Eşiği

• NO_x Emisyonları

Endüstriyel tesisler, araç trafiği, ev içi faaliyetler ve termik santraller tarafından yoğun olarak atmosfere salınan azot oksitler, atmosferde nitrik asite dönüşerek asit yağmurları gibi çevre sorunlarına yol açmakta ve maruz kalma sonucunda alt solunum yollarında ciddi hasar bırakabilmektedirler. Azot oksitlerin (NO_x) sebep olduğu tüm çevresel problemler, NO_x emisyonlarına katkıda bulunan sektörlerde emisyon azaltımı ihtiyacını doğurmaktadır.

IIR'ye (2021) göre Çizelge 1.3'de görüldüğü gibi Türkiye'de 1990-2019 yılları arası NO_x emisyonları %205 oranında artış eğilimi göstermiş, yıllar içerisinde 255 Gg'dan 779 Gg'a kadar yükselmiştir. NO_x kaynaklarının %41.8'i elektrik üretim sektörüne, %9'u karayolu taşımacılığına aittir (IIR, 2021).

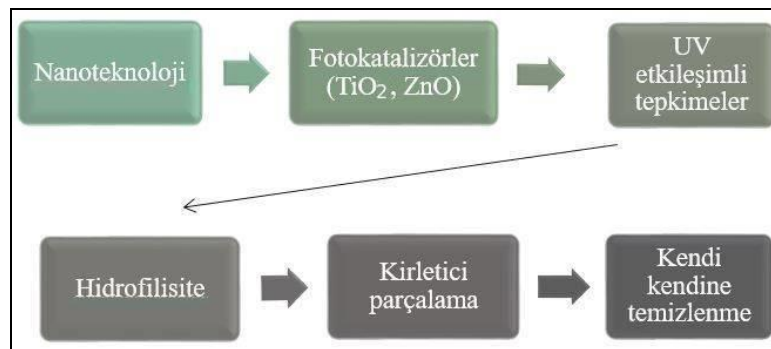
2. NANO ÇİMENTO KATKILI FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ

Nanoteknoloji; tıp, enerji, savunma, inşaat, elektronik, fizik, kimya gibi birçok kullanım alanı olan, malzemelerin nano boyutlarda karakterizasyonunu sağlayarak özelliklerini iyileştiren veya yeni özellikler kazandıran bir teknoloji olarak tanımlanabilir. Nano parçacıkların içindeki atomların kusursuz bir şekilde sıralanmış olması nedeni ile 100 nanometreden küçük boyutlarda malzemeler kendi özelliklerinden farklı karakteristik özellikler gösterebilirler (Mohajerani ve ark., 2019; Khandve, 2016).

Nanoteknolojinin yapı sektöründe kullanımı malzemelere yüksek dayanıklılık, kataliz, antibakteriyellik, yalıtım, yapılarda öz algılama ve öz izleme gibi üstün özellikler kazandırabilir. Yapı sektöründeki en yaygın kullanım alanlarından biri ise UV ışığı etkileşimli nano katalizörler kullanılan fotokatalitik oksidasyon (PCO) teknolojisidir.

2.1. Fotokatalitik Nanomalzemeler ve Özellikleri

Fotokatalitik kavramı, ışık enerjisinin ve fotokatalizörlerin kullanılması ile malzeme yüzeyinde meydana gelen kimyasal bir reaksiyon sonucu hem hava kirliliği kontrolü hem de yüzey temizliğinin sağlanması durumunu ifade eder. Fotokatalizörler ise UV ışınları ile aktive olan organik kirleticileri ayrıştırma özelliğine sahip ZnO, TiO₂ gibi yarı metallerdir. Çeşitli teknolojiler kullanılarak fotokatalizörlerin farklı malzemelere bağlanmasıyla fotokatalitik nanomalzemeler oluşturulmaktadır. Çalışma prensipleri ve etkileri Şekil 2.1’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.1. Fotokatalitik malzemelerin çalışma prensibi

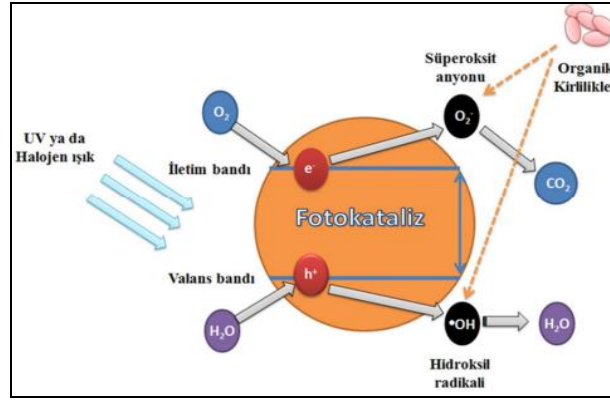
Yarı metaller arasında en çok TiO_2 kullanımı tercih edilmektedir ve bu duruma zararsız, kararlı, kolay elde edilebilir olması, ekonomik olması, doğada bol bulunması gibi sebepler gösterilebilir (Ünverdi ve ark., 2016). TiO_2 nano boyutlara getirildiğinde malzemenin üstün özellikler sergilediği görülmüştür. Bu nano parçacıkların şekil, boyut ve kristal yapılarının morfolojik özellikleri de büyük öneme sahiptir. TiO_2 rutil, anataz ve brookite olmak üzere üç yapıda kristalleşebilir. İlk başlarda rutil tip TiO_2 boya ve vernik endüstrisinde, tablolar ve kozmetiklerde pigment olarak kullanılmıştır (Sopov ve ark., 2020). Termodinamik olarak en kararlı formdur. Anataz; oda sıcaklığında kimyasal olarak kararlı olması, çinko oksit (ZnO) gibi diğer yarı metallere kıyasla daha ekonomik olması, aynı zamanda toksik olmaması sebebiyle günümüzde ticari olarak en çok tercih edilen TiO_2 formudur. Ayrıca en yaygın kullanıma sahip anataz TiO_2 'nin ortalama partikül boyutu 21 nm, anataz-rutil oranı ise 80/20'dir. Brookite kullanımı ise nadirdir (Sopov ve ark., 2020).

2.1.1. Fotokatalitik nanomalzemelerin çalışma mekanizması

Güneş ışınlarının veya aydınlatmalarla sağlanan UV ışınlarının etkisiyle yüzeyde hidroksil radikalleri oluşması sonucu, zararlı organik kirleticilerin parçalanmasını ve su, karbondioksit gibi zararsız nihai ürünlerin oluşmasını sağlayan kimyasal tepkimelerin tümü 'fotokataliz mekanizması' olarak adlandırılmaktadır (Ünverdi ve ark., 2016). Tepkimeler sonucunda yüzeyle temas halinde olan havadaki NO_x , SO_x , VOC (uçucu organik bileşikler) gibi birçok zararlı bileşik ayrıştırılabilir. Ayrıca anataz formundaki TiO_2 , bakteri çeşitlerini de oksitleyerek bozunmasını sağlar.

TiO_2 fotokatalizörü UV ışığındaki enerjiyi kullanarak yüzeyinde oksidasyon olayının gerçekleştiği bir yarı iletkenidir. Yarı iletkenler atomik yapılarında enerji seviyelerini ifade eden dolu bir valans bandı ve boş bir iletkenlik bandına sahiptirler. Emilen UV radyasyonu ile valans bandının doldurulması ve elektronların valans bandından iletkenlik bandına aktarımı gerçekleşir. Böylece elektron (e^-) ve boşluk (h^+) çiftleri oluşur (Ünverdi ve ark., 2016; Kuzmichev ve Loboyko, 2016; Sayılkan, 2007). h^+ , yüksek oksidasyon gücü sayesinde su ile reaksiyona girerek güçlü bir oksitleyici olan hidroksil radikallerini (OH) oluşturur. Bu tür radikaller partikül yüzeyi tarafından adsorbe edilen havadaki kirletici moleküllerle reaksiyona girebilirler ve organik

kirleticilerin çoğu hidroksil radikalleri tarafından tamamen zararsız nihai ürünlere bozunabilir (Delibaş ve Maraşlı, 2015) (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Fotokataliz mekanizması (Saribel, 2017)

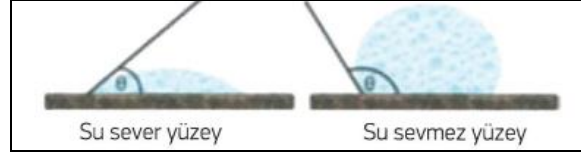
Havadaki NO_x emisyonlarının bozunma süreci ise kabaca fotokatalizörün yüzeyinde Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de gösterildiği gibi iki aşamalı bir reaksiyon olarak tanımlanabilir (Hüsken ve ark., 2009) (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. NO_x kirleticilerinin fotokatalitik bozunması (Pavetechinc, 2022)

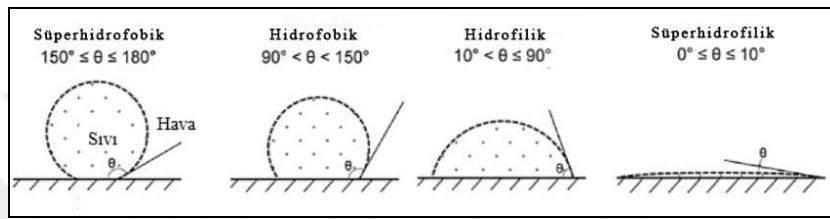
2.1.2. Fotokatalitik nanomalzemelerde süperhidrofilisite

TiO₂ kaplı bir film UV ışınlarına maruz kaldığında çok küçük bir su temas açısı ortaya çıkar. Bu yüzeyde su, damlacıklanma yerine düz bir şekilde yayılma eğilimindedir. Bu eğilime hidrofilisite adı verilir. Su damlasının ıslanma davranışı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Su damlasının ıslanma davranışı (Kula ve Karasu, 2017)

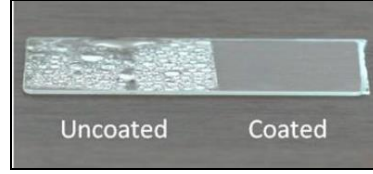
Su temas açısı Şekil 2.5'teki gibi 90° 'den küçükse yüzey hidrofilik ve 10° 'den küçükse süperhidrofilik özelliğe sahiptir. Ayrıca sıvı, yüzeyi ıslatıyorsa temas açısı $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, ıslatmıyorsa temas açısı $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 'dir (Arslan, 2019).



Şekil 2.5. Süperhidrofobik, hidrofobik, hidrofilik ve süperhidrofilik yüzeylerle temas açılarının şematik gösterimi (Arslan, 2019).

Fotokataliz sonucu ayrıştırılan yağ gibi organik kirleticiler, TiO_2 'nin süperhidrofilik özelliği sayesinde su ile yüzeyden kolayca yıkanabilmektedirler. Hidroksil radikali, organik bileşiklerin ayrışmasında önemli bir rol oynar. Hidrofilik davranış yüzey hidroksil gruplarının yoğunluğu ile ilgilidir ve UV ışınması altında artmaktadır. TiO_2 yüzeyinde daha fazla hidroksil grubu oluşabiliyorsa organik kirleticilerin bozunma verimliliği de geliştirilebilir. Böylece uzun süreli yüzey temizliği sağlanarak TiO_2 'nin UV ışınıyla temasının azalması engellenir bu da fotokatalitik verimliliğin zaman içerisinde azalmadan devam etmesini sağlar (Chen ve Poon, 2009; Kuloğlu Yüksel ve Karagüler, 2011; Schwarz ve ark., 1997)

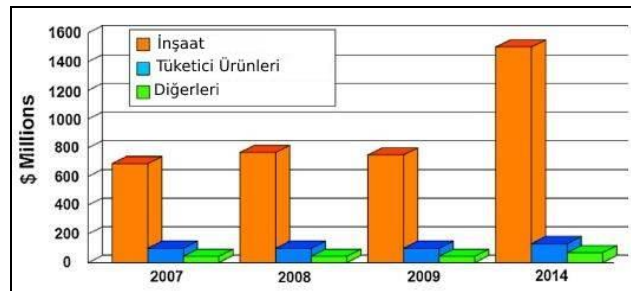
TiO_2 'nin yüksek hidrofilik davranışı ticari amaçlı olarak cam ve aynalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda, bir foto elektrokimyasal aşındırma tekniği ile TiO_2 parçacıklarına pürüzlülük verilerek aynı yüzeyde kontrollü olarak hem hidrofilik hem hidrofobik özellik kazandırılmaktadır (Hashimoto, 2007). Şekil 2.6'da TiO_2 kaplanmış hidrofilik yüzeyde ve kaplanmamış yüzeyde suyun davranışı gösterilmiştir.



Şekil 2.6. TiO₂ kaplanan ve kaplanmayan numunelerde suyun davranışı (Low, 2014)

2.1.3. Fotokatalitik nanomalzemelerin kullanım alanları

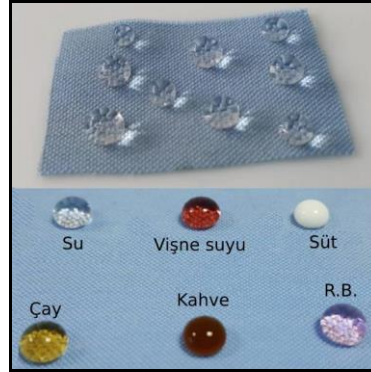
TiO₂, organik bağlayıcıları yok ederek "tebeşir etkisi" olarak bilinen boyama ve pigmentasyon etkisine yol açmıştır. Geleneksel TiO₂ esaslı yapı malzemelerinin pigment olarak uygulamalarda kullanılmaya ve zehirli kurşun oksit ile yer değiştirmeye başlaması 1910'lara dayanmaktadır (Blöß ve Elfenthal, 2007). 1969'dan itibaren Fujishima ve Honda (1972) TiO₂'nin su arıtma üzerindeki etkisiyle ilgili sonuçları yayınladıklarında, dünya çapında TiO₂'yi yeni amaçlarla kullanmak için araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Hastaneler, laboratuvarlar, mutfaklar gibi steril edilmesi gereken mekanlarda, ayrıca hava ve su arıtma sistemlerinde kendi kendini dezenfekte etme işlevinden yararlanılmış, TiO₂ kaplamalı seramik karoların kullanımı gündeme gelmiştir (Ramirez ve ark., 2010). Fotokatalizörlerin yapı malzemeleri ile birlikte kullanımı 1990'lara uzanmaktadır. 2003 yılında, fotokatalitik yapı malzemelerinin satışı, Japonya'daki tüm fotokatalitik ürünler içerisinde pazar payının %60'ını oluşturuyordu. 21. yüzyılın başından bu yana ise fotokatalitik malzeme kullanımı ve bu alandaki araştırmalar artarak devam etmektedir. Bu doğrultuda Şekil 2.7'de malzemenin yıllara göre ve küresel pazardaki yerine göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.7. Fotokatalitik ürünlerin küresel pazardaki yeri (Spasiano ve ark., 2015)

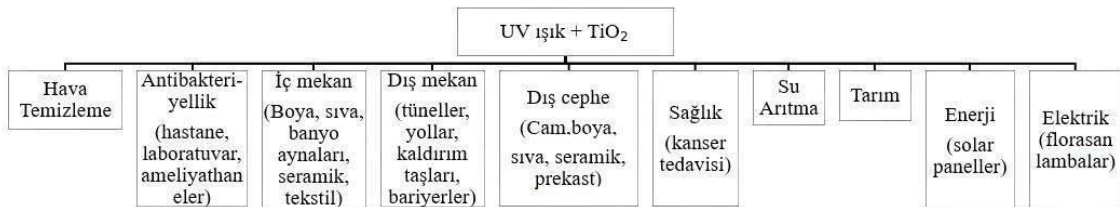
Fotokatalitik malzemelerin çok yönlü işlevselliği hem dış mekanda peyzaj alanlarında ve bina cephelerinde, hem de iç mekanda mobilya ve tekstil ürünlerinde kullanılmasını kolaylaştırmıştır (Chen ve Poon, 2009). Şekil 2.8'de görülen kumaş çok

yönlü özelliğe sahip olması için TiO_2 -PDMS-Ag birleşimi ile kaplanmış ve kumaşa hidrofobik özellik kazandırılmıştır.



Şekil 2.8. TiO_2 -PDMS-Ag kaplı süperhidrofobik kumaşın davranışı (Görgülter ve ark, 2021)

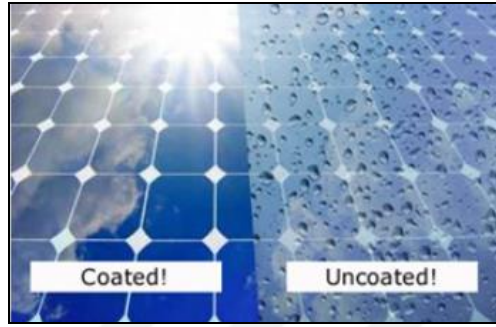
TiO_2 katkılı malzemeler su arıtmada, kanser tedavilerinde, güneş panellerinin yüzey kaplamalarında, floresan lambalarda, otomobil aynalarının ve tünellerdeki aynaların yüzeyinde kullanıldığı gibi mimari alanda; cam, seramik karo, taş, beton panel gibi malzemelerde kendi kendini temizleme amaçlı ve yapılarda iklimlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da TiO_2 kaplı otomobil aynaları, Şekil 2.11'de TiO_2 kaplı güneş panelleri gösterilmiştir. İç ve dış cephe boyalarında, geleneksel malzemelerin yüzeylerine püskürtülerek uygulanan TiO_2 kaplamalarda, çimentolu harçlarda ve sıvalarda, dış mekanlarda parke bloklarında, beton kaldırımlarda, beton bariyer elemanlarında TiO_2 fotokatalizör kullanımı, özellikle son yıllarda daha sık tercih edilmektedir. Aynı zamanda kirliliğin yüksek olduğu yoğun bölgelerde hava kirliliğinin kontrolünde de kullanılmaktadır (Kuloğlu Yüksel ve Karagüler, 2011). Genel kullanım alanları Şekil 2.9'da şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.9. Fotokatalitik malzemelerin yaygın kullanım alanları (Nakata ve Fujishima, 2012)



Şekil 2.10. TiO₂ kaplı otomobil aynaları (Zhang ve ark., 2012)



Şekil 2.11. TiO₂ kaplı güneş panelleri (Saarchem, 2022)

2.1.3.1. İç mekanlarda kullanımı

İç mekan hava kirleticileri esas olarak karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), ozon, formaldehit, azot oksitler (NO_x), uçucu organik bileşikler (VOC) ve partikül maddeleri içerir. Birçok uçucu organik bileşiğin toksik ve kanserojen olduğu bilinmektedir. Fotokatalitik oksidasyon (PCO) teknolojisi, organik kirleticileri, zararsız substratlara mineralize edebildiği ve iç ortamlardaki kirleticilerin konsantrasyonları genellikle düşük olduğu için iç mekan hava kalitesinin iyileştirilmesinde en uygun seçeneklerden biridir (Wang ve ark., 2007).

Fotokatalitik malzemeler hastanelerde, halka açık hijyen gerektiren alanlarda, ıslak hacimlerde, mutfaklarda; hem kendini temiz tutma özelliğine sahip hem de iç mekan hava kalitesini iyileştiren fotokatalitik seramik, boya ve yüzey kaplamaları başta olmak üzere birçok kullanım alanına sahiptir. Buğulanmayan, su ve yağ lekesi tutmayan ayna ve camlar, mutfak tezgahları, yer karoları, iç cephe boya, duvar kağıtları kullanım alanlarından bazılarıdır. Türkiye’de iç mekanlarda kullanılan fotokatalitik seramik zemin ve duvar uygulamaları için Fulya Acıbadem Hastanesi, İzmir Kent Hastanesi, Memorial Hastane, ODTÜ Kolej Ankara, Zorlu PSM, Özdilek AVM gibi binalar örnek verilebilir (Kale, 2017).

Kapalı alanlardaki fotokatalitik hava kirleticilerinin bozunması esnasında oluşan yan ürünler ve fotokatalitik verimliliğin yeterliliği ile ilgili daha geniş ölçekli araştırmalara ihtiyaç vardır. Auvinen ve Wirtanen'in (2008) çalışmasında iç mekanda 6 farklı fotokatalitik boya teste tabi tutulmuş ve yeteri kadar VOC ve formaldehit temizlenemediği, fotokataliz sonucu sadece karbondioksit ve su oluşmadığı ve zararlı yan ürünlerin oluşabileceği ortaya koyulmuştur. Fakat zararlı olabilecek bu tür yan ürünlerle ilgili yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

2.1.3.2. Dış mekanlarda ve cephelerde kullanımı

Fotokatalitik malzemeler hava kirliliğinin yoğun olduğu dış mekanlarda veya yüzey temizliğinin öncelikli olduğu binalarda kaplama, boya, seramik ve çimento esaslı malzemeler başta olmak üzere farklı kullanım alanlarına sahiptir.

- **Fotokatalitik yüzey kaplamaları**

Cam, metal, seramik, taş gibi birçok malzemenin kendini temizlemesini sağlayan en ekonomik, yaygın ve kolay uygulanabilen yöntem TiO_2 bazlı ince filmlerdir (Zhao ve ark., 2008). Yaygın olarak sol-jel üretim tekniği sonucu ince film kaplamalar ve ultrasonik sprej piroliz tekniği sonucu püskürtme işlemi ile yüzeylere fotokatalitik özellik kazandırılır (Sarıgül ve Sorar, 2016).

TiO_2 filmler doğası gereği hidrofilik olmakla birlikte hidrofobik hale de getirilebilir. Bazı aşındırma teknikleri ile yüzey yapısı değiştirilip yüzey pürüzlülüğü artırılır (Hashimoto ve ark., 2005). Böylelikle su ve yağ lekesi tutmayan, özellikle yağmur suyunun temizleyemeyeceği iç mekanlarda daha çok tercih edilen kaplamalar elde edilir.

Fotokatalitik ince filmler genellikle saydam cepheye sahip yüksek katlı binalarda, yüksekliğe bağlı temizliğin zorlaşması sebebiyle oldukça sık tercih edilen malzemelerdir. Fakat mevcut yapı malzemesinin üzerine uygulanan ince saydam bir kaplama olduğu için dış ortam koşullarına karşı zamanla aşınma eğilimindedir ve yaklaşık 4-5 sene aralıklarla yenilenmesi gerekir.



Şekil 2.12. Infoscore ofis binası, Baden- Baden, Almanya (Ćurćić, 2018)

Infoscore'un ofis binasında cephenin cam kısmı dikey monte edilmiş ve konumundan dolayı yoğun yağış etkisi altındadır, bu yüzden cam bölümde TiO_2 film kaplama tercih edilmiştir (Şekil 2.12). TiO_2 ince filmlerin kendi kendini temizliyor olmaları hiç temizlik gerektirmedikleri anlamına gelmemektedir. Cam yüzeyler de standart camlara göre daha az sıklıkla olmakla birlikte, belli aralıklarla basit bir şekilde temizlenmelidir.



Şekil 2.13.Yenileme çalışmalarından sonra Brive-la-Gaillarde Hastanesi (Ćurćić, 2018)

Fransa'daki Brive-la-Gaillarde Hastanesi 1976 yılında inşa edilmiş, 2012 yılında yenileme süreci başlamış ve güneydoğu ile güneybatı cephelerine çift cidarlı cam uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.13). Camlar TiO_2 filmle kaplanmış ve güneşliklerin eğimi yağmur suyunu cephe boyunca taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Cephe ile güneşlik arasında yağmur suyunun akışına izin verecek kadar boşluk vardır (Ćurćić, 2018).



Şekil 2.14. Universal Studio Japonya (Greenmillennium, 2022)



Şekil 2.15. Yahoo Dome Stadyumu Japonya (Greenmillennium, 2022)



Şekil 2.16. Tayvan Tekstil Araştırma Enstitüsü (Greenmillennium, 2022)

Japonya'daki Universal Studio'nun dış cephe duvarlarında ve boyalı yüzeylerinde, Japonya'daki Yahoo Dome Stadyumu'nun dış cephe duvarlarında, Tayvan Tekstil Araştırma Enstitüsü'nün cephesinde bulunan fayans, cam ve beton elemanlarda fotokatalitik TiO_2 kaplama kullanılmıştır ve sırasıyla Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16'da gösterilmiştir (Greenmillennium, 2022).



Şekil 2.17. Manuel Gea Gonzalez Hastanesi ve cephe modülleri (Prosolve370e, 2022)

Manuel Gea Gonzalez Hastanesi'nin cephesi, TiO_2 kaplamalı modüllere sahip olması sebebiyle duman yiyen cephe olarak da bilinmektedir (Şekil 2.17). 1992'de hava kirliliği en yüksek şehir seçilen Meksiko-City'de inşa edilen hastane için çevresindeki emisyonu azaltması amacıyla ikinci bir cephe elemanı tasarımı yapılmıştır. Her bir modül en yüksek fotokatalitik etkinliğin sağlanması için yüzey alanı artırılarak yarı

kristal şekilde tasarlanmış ve modüller birleştirilerek akıllı bir cephe tasarımı yapılmıştır. Bu tasarlanan geometri ile cephenin yüzey alanı %200 artırılmış ve maksimum düzeyde ışığa maruz kalması sağlanmıştır (Altın ve Orhon, 2014).

Asfalt yollarda ve kaldırımlarda görülen TiO_2 uygulama yöntemlerinden biri ise püskürtmeli sıcak ve soğuk uygulamalardır (Crispino, 2010). Sıcak uygulamalar yeni dökülen asfalt üzerinde Şekil 2.18'deki gibi, soğuk uygulamalar ise mevcut asfalt üzerine Şekil 2.19'daki gibi uygulanır.



Şekil 2.18. TiO_2 sıcak uygulama (Crispino, 2010)



Şekil 2.19. TiO_2 soğuk uygulama (Crispino, 2010)

- **Fotokatalitik seramik cephe kaplamaları**

Seramiklerde TiO_2 uygulaması esnasında, TiO_2 içeren bir sıvı süspansiyonun püskürtülmesi ardından 600 - 800 °C sıcaklıklarla sinterleme işlemi yapılır ve TiO_2 ince bir katman halinde karo yüzeye güçlü bir şekilde bağlanır. TiO_2 içeren karo yüzeyler, organik bileşikler ile seramik yüzey arasındaki bağı kırarak organiklerin parçalanmasını ve yüzeyin temizlenmesini sağlar (Chen ve Poon, 2009).

Daniel Libeskind şehirdeki ilk konut projesi için Berlin'e geri gelerek kendi kendini temizleme ve hava temizlemeye yardımcı özelliğe sahip paneller tasarlamıştır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Daniel Libeskind - konut projesi (Ćurćić, 2018)



Şekil 2.21. Vanke Pavilyonu-Daniel Libeskind (Ćurćić, 2018)

Vanke Pavilyonu cephe kaplamasında Libeskind'in İtalyan şirketi Casalgrande Padana ile tasarladığı 4.000'den fazla kırmızı seramik kullanılmıştır (Şekil 2.21). Karolar ışığa göre değişen metalik renge sahip fotokatalitik malzemelerdir (Ćurćić, 2018).



Şekil 2.22. Koç Üniversitesi Hastanesi (Kale, 2017)



Şekil 2.23. İTOB Organize Sanayi Bölgesi Yönetim Binası (Arkiv, 2022)

Koç Üniversitesi Hastanesi ve İzmir Menderes'te bulunan İTOB Yönetim Binası dış cepheleri, fotokatalitik özellikli sinterflex seramik malzeme ile kaplanmış, ince ve hafif bir malzeme olması itibarıyla kolay uygulanabilen ve kendini temiz tutan bina kabukları oluşturulmuştur (Kale, 2017) (Şekil 2.22, Şekil 2.23).



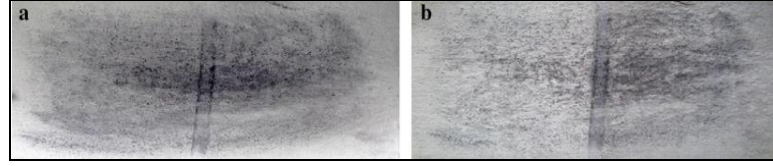
Şekil 2.24. Şişli Belediyesi Yeni Hizmet Binası (Mimdap, 2015)

Dış cephede kaplama malzemesi olarak tercih edilen, iç mekanda ise zemin ve duvar uygulamalarında kullanılan fotokatalitik özellikli ince sinterflex seramikler, Şekil 2.24’de görülen Şişli Belediyesi Yeni Hizmet Binası’nda 2000 m²’nin üzerinde kullanım alanına sahiptir. Bu alanın büyük çoğunluğu iç mekandadır (Xxi, 2015; Kale, 2017).

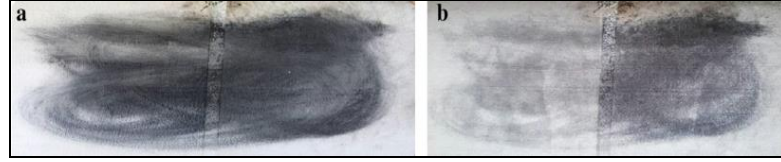
- **Fotokatalitik boya uygulamaları**

Farklı bağlayıcılarla birleştirilmiş fotokatalitik boyalar iç ve dış mekanlarda en sık kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Boya içeriğine göre fotokatalitik etkinlik değişebilmektedir. Organik içerikli boyalarda TiO₂ etkisiyle organik bağlayıcıların ayrışmasından dolayı malzemede bozulmalar görülebilir ve fotokataliz etkisini kaybedebilir (Chen ve Poon, 2009). TiO₂ karıştırılan farklı içeriklere sahip boyaların özelliklerinin değerlendirilmesi için gerçek ölçekli çalışmalar yapılmış ve pasif hava temizliğine katkı sağladığı doğrulanmıştır (Maggos ve ark., 2007).

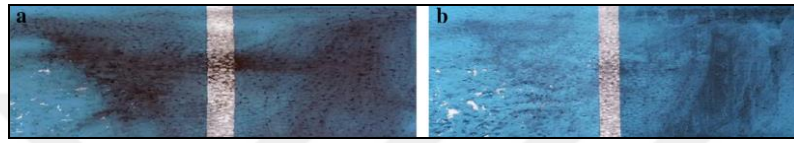
Mansour ve Al-Dawery’in (2018) çalışmasında hava kirliliğinden kaynaklı bina cephelerindeki kirlenmeler Kahire ve Beyrut’ta bulunan bazı binalar üzerinden incelenmiştir. Aynı zamanda yağ bazlı beyaz boya, su bazlı beyaz boya ve su bazlı mavi boya olmak üzere 3 farklı boya ile numune paneller boyanmıştır. Her numune iki bölüme ayrılarak sol kısma TiO₂ katkılı boya ile, sağ kısma normal boya ile uygulama yapılmış ardından organik kirleticilere ve güneş ışığına maruz bırakılmıştır. Sonuçlar Şekil 2.25, Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de gösterilmiştir. UV ışınlarının etkisi ile yüzeydeki lekelerin azaldığı görülmektedir. Maliyet hesabı yapılarak düşük bir bütçeyle, gelişmekte olan ülkeler için sürdürülebilir ekonomik bir yöntem olarak bina cephelerinde fotokatalitik boya kullanımı önerilmiştir.



Şekil 2.25. Beyaz su bazlı boya örnekleri



Şekil 2.26. Beyaz yağ bazlı boya örnekleri



Şekil 2.27. Renkli su bazlı boya örnekleri

- **Fotokatalitik Çimento Esaslı Malzemeler**

Çimento harçları, beton parke taşları, çimento esaslı çatı kaplamaları ve kiremitler fotokatalizörlerin yapı malzemelerinde kullanılmaya başlandığı ilk örneklerdir. İlk patenti İtalya'da alınmış ve 1995-2010 yılları arasında İtalcementi firması tarafından birçok açık ve kapalı alanda teste tabi tutulmuştur. Tüm araştırmalar sonucu fotokatalitik etkisi doğrulanmıştır. Avrupa'da ve Japonya'da birçok uygulanmış örneği mevcuttur (Ünverdi ve ark., 2016). Şekil 2.28'de fotokatalitik çimento esaslı malzeme kullanımının yıllar içerisindeki gelişimi özetlenmiştir.

Çimento matrisinin doğası TiO_2 nano partiküllerinin toz halinde karıştırılması için uygundur ve TiO_2 çimentonun yapısını bozmayan bir fotokatalizördür (Chen ve Poon, 2009). Beton yüzeyine TiO_2 'nin şeffaf olarak sol-jel daldırma ya da püskürtmeli kaplama şeklinde entegre edilmesi alt tabakaya zayıf bağlanmasına sebep olur ve aşınma nedeniyle 4-5 yıl içerisinde yenilenmesi gerekir. Çimentonun içeriğine doğrudan karıştırılması ise TiO_2 'nin malzemeye daha sıkı bağlanmasını ve zorlu dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlar (Shen ve ark., 2015).

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1995-1998 | Çimento esaslı sistemlerde fotokataliz üzerine Ar-Ge programı İlk patent başvurusu (1996, İtalya) İlk yayınlar İlk somut denemeler |
| 1999-2001 | İlk proje: 'Dives in Misericordia' Kilisesi, Roma 'Cité de la Musique et des Beaux-Arts', Chambéry Rhodamine B (renk değişikliği) testi, (CSTB, Fransa) |
| 2002-2005 | PIADA Projesinin Başlangıcı (2002-2005) Sokak kanyonu deneyimi Fotokatalitik çimentonun (TX Millenium®) ilk versiyonunun Segrate, Calusco, Bergama'da pilot imha testleri Laboratuvar test yöntemlerinin geliştirilmesi |
| 2006-2017 | Tx Active Cements'in piyasaya sürülmesi (İtalya, Fransa, ABD) İlk UNI standartlarının yayınlanması (İtalya) 'Umberto I' Tüneli (Roma, 2007) Heidelberg Cement Group ile yapılan lisans anlaşması (2008) Projeler: i.lab, Bergamo Vodafone Köyü, Milano |

Şekil 2.28. Çimento esaslı fotokatalitik malzeme kullanımının tarihsel gelişimi (Topçu ve ark., 2020)

Çimento esaslı fotokatalitik ürünlerin uygulama alanları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Rekreasyon alanları, yol, kaldırım, gürültü bariyerleri, tüneller, cephe elemanları ve çatı kiremitleri fotokatalitik çimento kullanımı için en uygun yatay ve düşey uygulama alanlardır. Şekil 2.29'da yolların TiO_2 karıştırılan çimentolu harçla kaplandığı, Şekil 2.30'da ise kaldırım taşlarında ışığın temas ettiği yüzey kısmında ince bir tabaka halinde kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Çimento esaslı fotokatalitik ürünlerin uygulama alanları

| Yatay Uygulamalar | Düşey Uygulamalar |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kilitli parke taşları • Beton kaldırımlar • Beton kaplamalar (Çimentolu harç ile) • Beton çatı kiremitleri | <ul style="list-style-type: none"> • Mimari prekast paneller • Kaplama elemanları (Çimentolu harç ile – tünel duvarları) • Yollar ve otoyollar için gürültü bariyerleri • Beton orta bariyerler |



Şekil 2.29. TiO_2 karıştırılmış çimento harcının ve asfalt tabakaya dökümü (Crispino, 2010)



Şekil 2.30. Fotokatalitik çimento ile üretilmiş kaldırım taşı (Archiproducts, 2022)

Yatay elemanlar dışında en yaygın kullanım alanına sahip düşey elemanlar, bina cephelerinde kullanılan fotokatalitik çimento katkıli prekast paneller ve çimento harçlı boyalardır. Bu boyalar esasen TiO_2 karıştırılmış çimento harcının yüzeye püskürtülmesi şeklinde uygulanır. Avrupa’da birçok saha testinde tünel duvarlarında aynı şekilde uygulama yapılmıştır. Şekil 2.31’de tünel duvarlarındaki uygulama ve Şekil 2.32’de İtalya’da bir kilisenin dış cephesindeki uygulama öncesi ve sonrası hali görülmektedir.



Şekil 2.31. Çimento esaslı fotokatalitik boya ile püskürtmeli uygulama yöntemi (Guerrini, 2012)



Şekil 2.32. İtalya ‘Matrice di Cittanova’ Kilisesi (Cimax Ecosystem, 2022)

Çimento esaslı malzemelerde TiO_2 genellikle beyaz çimento ile kullanılmaktadır çünkü gri çimentoda yüzeydeki kirlerin parçalanması sonrası beyaz lekelenmeler görülmüştür (Ünverdi ve ark., 2016).

Ünverdi ve ark.'nın (2016) çalışmasında TiO_2 'nin derz dolgu malzemeleri üzerinde kendi kendini temizleme etkisini görmek için boya deneyi yapılmıştır. Farklı numuneler üzerine kırmızı renkli Rhodamine-B solüsyonu dökülerek UV ışınına maruz bırakılmış ve renk ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Kırmızı rengin rutil TiO_2 karıştırılan numunelerde % 80, anataz TiO_2 ile oluşturulan numunelerde % 60 kaybolduğu ve anataz TiO_2 bulunan numunelerin çok daha hızlı sonuç verdiği görülmüştür.

2.1.4. Fotokatalitik çimentonun kentsel ölçekte kullanımı

Fotokatalitik çimentonun kentsel alanlarda kullanımı uzun süredir araştırılmakta, birçok test ve saha ölçümüne tabi tutulmaktadır. Bina cephelerinde malzemeden öncelikli beklenen temizlik ve bakım masraflarını azaltması ve bina kabuğunu kalıcı kirden koruması söz konusudur. Havadaki kirleticilerin giderilmesi noktasında binanın yakın çevresinde belli oranda hava kalitesi iyileştirilebilir. Fakat kent ölçeğinde geniş alanlarda kullanımda öncelikli beklenti, şehirlerde giderek artan araç emisyonları ve diğer zararlı bileşenlerin (NO_x , SO_x , VOC, PM10) etkisini azaltmaktır. Şekil 2.33'de kent ölçeğinde fotokatalitik beton kullanımı ile kirleticilerin bozunma durumu şematik olarak gösterilmiştir.

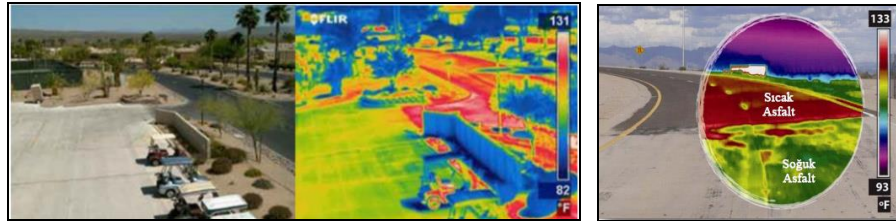


Şekil 2.33. Kentsel alanlarda fotokatalitik beton kullanımı (İtalcementi Group, 2022a)

Beyaz çimentolu fotoaktif yüzeyler, yüksek yüzey yansıtıcılıklarıyla ısı kontrolü sağlayabilir ve renklerini muhafaza edebilirler. Yüzeylerinde kararmalar görülen malzemelerin yansıtma gücü ise zamanla azalma eğilimi gösterir. Asfalt buna verilebilecek en iyi örnektir ve beton malzemelerin genelinde bu sorun yaşanabilir. Gri betonun 40 Hunter L ölçüm değerine karşılık, beyaz betonun 85 değerine kadar yükselebilen Hunter L ölçümüne sahip yansıtması vardır. Beton yüzeyler ıslak

olduğunda fark daha büyüktür. Islak gri betonun Hunter L değeri yaklaşık 20 iken beyaz betonun değeri yaklaşık 70'dir. Şekil 2.34'deki kızılötesi görüntü, açık renkli betonun koyu renkli asfalt yoldan daha serin kaldığını gösterir (Topličić-Ćurčić ve ark., 2016).

Sıcak iklim bölgelerinde yüksek yansıtıcılı fotokatalitik kaplamaların çatılara, bina cephelerine, asfalta, peyzaj alanlarına uygulanması küresel fayda sağlaması açısından umut vericidir.



Şekil 2.34. Koyu ve açık renkli asfalt yolların kızılötesi görüntüleri (Topličić-Ćurčić ve ark., 2016; Countonconcrete, 2008)

İtalcementi Group'un yaptığı saha çalışmaları başta olmak üzere açık hava şartlarında çeşitli testler ve ölçümler yapılmıştır (Çizelge 2.2). Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda daha yüksek fotokatalitik verimlilikler edilmesi ile birlikte sonuçlar olumlu yönde tutarlıdır.

Çizelge 2.2. Farklı saha çalışmalarına ait NO_x bozunma yüzdeleri

| Kullanılan malzeme | Test Sahası | NO _x Bozunma Yüzdesi | Kaynak |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Fotokatalitik çimento esaslı harç kaplama | Sokak kanyonu | Sağ duvar: %41.2 - %82 Sol duvar: %36.7 - %75.1 | (Sakthivel, 2019) |
| Fotokatalitik çimento esaslı boya | İtalya-Roma-'Umberto I' tüneli | 1.izleme : %20 2.izleme: %50 (yoğun kirlilik) Resmi çevresel verilere göre hesaplanan: % 50 | (Guerrini, 2012) |
| Fotokatalitik kaldırım taşı | Hollanda Hengelo'da yolun bir bölümü | Gözlemlenen: %19-%28 Optimum koşullarda: %45 | (Ballari ve Brouwers, 2013) |
| Fotokatalitik çimento esaslı harç kaplama | Milano Segrate-yolun bir bölümü | Optimum koşullarda: %60 | İtalcementi Group, 2022a |
| Fotokatalitik kilitli parke taşı | İtalya- Bergamo - İtalcementi fabrikası | %45 | İtalcementi Group, 2022a |

2.1.5. Fotokatalitik nanomalzemelerin kullanım zorlukları ve sınırlamalar

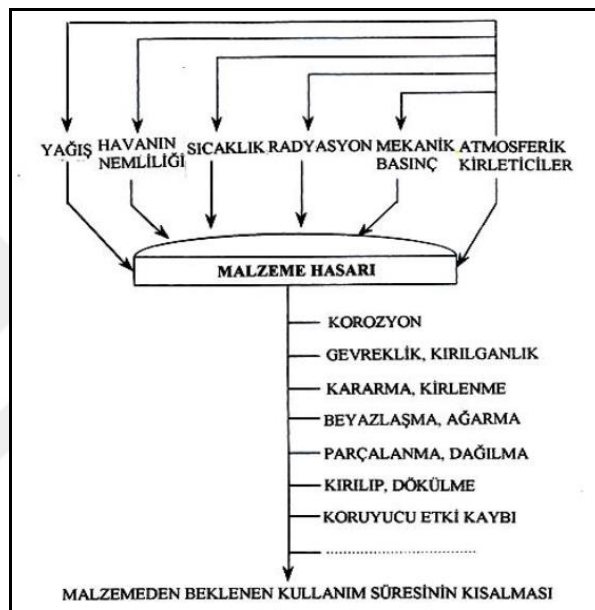
- İç mekanlarda TiO₂ fotokatalizi sonucu üretilen ve insan sağlığı için ciddi bir endişe kaynağı olan yan ürünlerin niteliği ve niceliği üzerine yapılan araştırma sayısı oldukça azdır. Salthammer ve Fuhrmann (2007), yaptıkları çalışma ile TiO₂ katkılı iç mekan duvar boyalarının ışığa maruz kaldığında, boyaların bileşimi ile ilgili formaldehit, asetaldehit, etilakrolein, pentanal, hidroksi bütanon ve hekzanal gibi istenmeyen yan ürünler üretebileceğini öne sürmüşlerdir.
- Dayanıklılık, fotokatalitik yapı malzemeleri için en önemli faktörlerden biridir. Fayans, cam gibi malzemelerde yüksek sinterleme sıcaklıkları ile TiO₂ tabakası malzemeye bağlanır ve kalıcı hale getirilir. Fakat PVC (polivinilklorür) gibi organik yapı malzemeleri bu yüksek sinterleme sıcaklığını tolere edemez. Bu yüzden her malzeme için uygulanması mümkün değildir.
- Organik kirleticilerde olduğu gibi organik yapı malzemeleri de fotokatalitik reaksiyonlar tarafından parçalanma eğilimindedir. TiO₂, sadece fotokatalitik aktivitenin değil mukavemetin de azalmasına ve malzemenin hasar görmesine sebep olabilir. Bu nedenle organik maddeler ile TiO₂ katmanı arasına bir ara katman yerleştirilmelidir. Bu da üretim maliyetlerini artıracaktır.
- Beton yüzeyler söz konusu olduğunda, fotokatalitik aktivitenin olası azalmasını önlemek için beton ve diğer çimentolu malzemelerde organik katkı kullanımını en aza indirilmelidir.
- Kaldırım taşlarında ve asfalt yollarda TiO₂ uygulaması için mekanik aşınmaya karşı direncin tam olarak incelenmesi gerekmektedir.

2.2. Fotokatalitik Nano Çimentonun Beton Esaslı Prekast Elemanlarda Kullanımı

Doğal ve insan kaynaklı kirlenmelerin etkisiyle yapı dış yüzeyinde leke görünümü, renk solmaları, asitlerin neden olduğu korozyon veya aşınma gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir (Şekil 2.35). Bozulmanın derecesi atmosferik faktörlere ve cephede kullanılan malzemeye göre değişiklik gösterebilir. Bu atmosferik etkilere nem, yağış, rüzgar, sıcaklık, güneş ışığı ve hava basıncını örnek verebiliriz. Atmosferdeki kirletici gazlar, insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemesinin yanı sıra betonarme elemanların zaman içerisinde korozyona uğrama, karbonatlaşma gibi bozulmalarla

dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Böylece bakım ve restorasyon maliyetleri artar. Özellikle kükürt dioksit (SO₂) ve azot dioksit (NO₂) emisyonlarının neden olduğu yapısal bozulmalar ciddi seviyelere ulaşabilir.

Betondaki yeni gelişmeler, çevresel hava kirliliğini azaltabilen ve beton yüzeyinin uzun yıllar temiz kalmasını sağlayan TiO₂ nanopartiküllerin çimentolu harçlara dahil edilmesini sağlar (Sopov ve ark., 2020). Fotokatalizörlerin hem yapı malzemelerinin mekanik özellikleri açısından hem de çevreye ve insan sağlığına zarar vermemesi açısından yasal olmaları önemlidir.



Şekil 2.35. Çevresel etmenler ile atmosferik kirleticilerin dış duvarda meydana getirdiği hasarlar (Göçer, 2005)

TiO₂ nanopartikülleri içeren çimento esaslı malzemeler, yoğun kentsel kirliliğin etkisi altında dahi estetik özelliklerini, özellikle de renklerini uzun süre korurlar.

2.2.1. Prekast elemanlara fotokatalitik özellik kazandırılması

Betonda fotokatalizden yararlanmaya yönelik en son yaklaşım teknolojik ve ekonomik boyutuyla da ele alınabilecek, fotokatalitik cam elyaf takviyeli betonun (GRC) geliştirilmesi olmuştur ve son yıllarda özellikle Avrupa ülkelerinde inşaat uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Prekast panellerden yapılmış mimari kabukların özelliklerini iyileştirmek ve onlara yeni özellikler kazandırmak için çimento harcının içerisine TiO₂ ilavesinin kullanılması önerilmektedir. Böylece beton yüzeyde

oluşacak kirleri kendi kendine temizleme ve NO_x oksidasyonu nedeniyle atmosferin temizlenmesi şeklinde iki ana etkiden faydalanılacaktır (Sopov ve ark., 2020).

Prekast panel üretiminde, panellere tipik bir püskürtme işlemi ile fotokatalitik özellik kazandırılabilir. Kalıp üzerinde ilk önce lifsiz taze bir matris karışımı çok ince bir sis tabakası halinde biriktirilir (García ve ark., 2018). Bu ince tabakada, sıradan çimentonun TiO_2 katkılı çimentoyla değiştirilmesi malzemeye fotokatalitik özellik sağlar. TiO_2 miktarı yaklaşık %3 oranında tutulduğunda olumlu sonuçlar alınmıştır (Nazari ve Riahi, 2011). Farklı çalışmalarda bu optimum oran %2 ile %5 arasında değişebilmektedir. Bu durumda, TiO_2 miktarı ve üretim sürecindeki herhangi bir değişiklik asgari düzeydedir.

Hanson'un (2014) çalışmasında yapılan deneyde, Şekil 2.36'da görüldüğü gibi ilk katmanda TiO_2 olacak şekilde cam elyaf katkılı fotokatalitik özellikli prekast paneller oluşturulmuştur. Önce %5 TiO_2 karıştırılmış beyaz çimentolu beton ince bir şekilde kalıba yerleştirilmiştir. Bu ilk katman, dış ortama maruz kalan katmandır. İkinci katmanda ise dayanıklılık için daha yüksek lif içeriğine sahip TiO_2 içermeyen beton yerleştirilmiş ve düzeltilmiştir (Şekil 2.37).



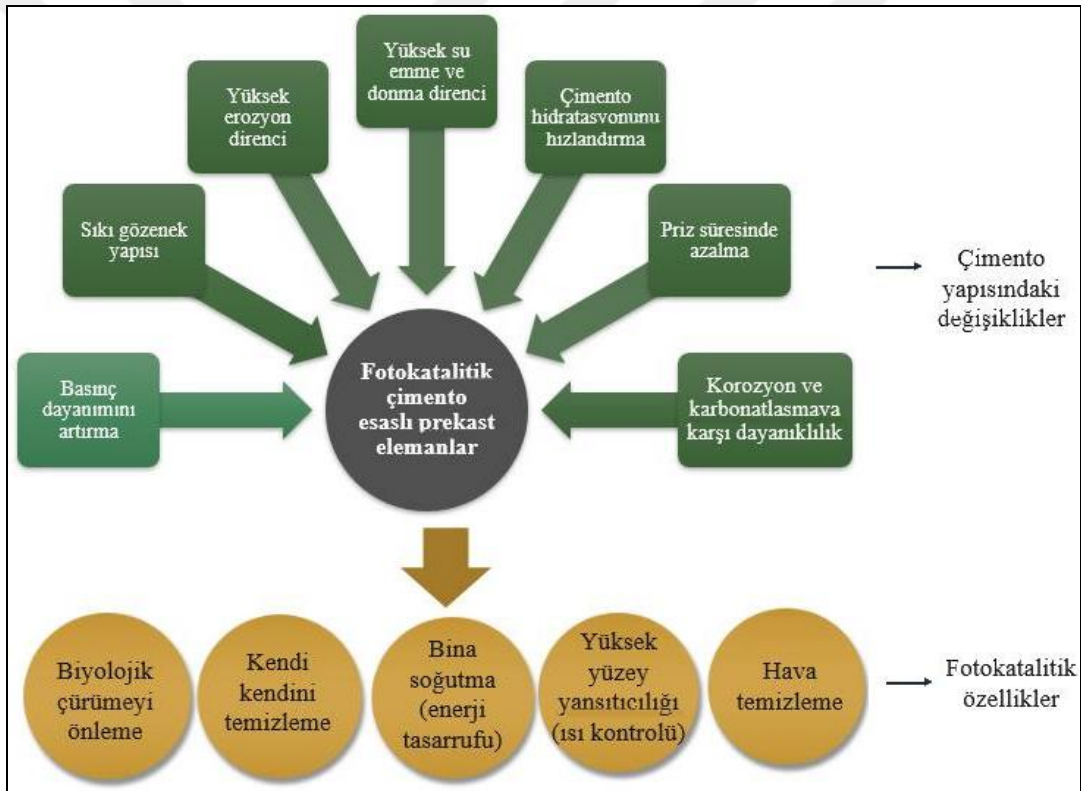
Şekil 2.36. Fırça ile düzeltilen ilk katman



Şekil 2.37. GRC numunenin ikinci katmanının yerleştirilmesi

2.2.2. Fotokatalitik prekast elemanların özellikleri ve teknik avantajları

Beyaz çimentolar, geleneksel gri portland çimentoya göre çok daha üstün özelliklere sahiptir ve son yıllarda prekast sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotokatalitik özellik kazandırılan, hem ekonomik olarak avantajlı hem de estetik açıdan kendini dış ortamdan koruyabilen özel beyaz çimentolar geliştirilmiştir. Uygulanmış yapı örnekleri ve piyasada satışa sunulan TiO_2 katkılı çimentolar incelendiğinde yaygın olarak beyaz çimentoyla üretildiği ve kullanıldığı görülmüştür. TiO_2 'nin çimentoda meydana getirdiği değişiklikler ve bina cephelerinde hafif prekast elemanlarda kullanımı sonucu ortaya çıkan fotokatalitik özellikler Şekil 2.38'de gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Fotokatalitik çimentonun ve fotokatalitik prekast elemanların özellikleri

Yüksek erken mukavemet, durabilite, alkali silika reaksiyon direnci, kalıptan çıkma süresinin hızlanması ve üretim hızındaki artışlar fotokatalitik çimentonun prekast uygulamalarındaki bazı teknik avantajlarıdır. Düşük alkalili çimento sınıfında yer alır, içeriğindeki TiO_2 sayesinde gözenek yapısı iyileşir, ince öğütüldüğü için su emme direnci yüksektir ve geçirimsizliği düşüktür. Bu nedenle dış mekân uygulamalarında

donma ve çözünmeye karşı malzemeyi korur. Tüm bunlar prekast ürünler için agresif dış ortam şartlarında yüksek dayanıklılık sağlar (Çimsa, 2022a; Çimsa, 2022b).

TiO₂'nin antibakteriyel özelliği beton yüzeylerde biyolojik büyümeyi kontrol etmek için de kullanılabilir. Özellikle tasarımdan ve bağlantı, uygulama veya bakım hatalarından kaynaklı bina yüzeyinin sık sık ıslanmaya maruz kaldığı yerlerde biyolojik çürümeler kendini gösterebilir, yüzeyde lekelenmeler ve renk değişiklikleri gözlenebilir. Bu durumun beton yüzeylerin kimyasal yapılarında da birtakım tahribatlara yol açabileceği belirtilmektedir (Chen ve Poon, 2009).

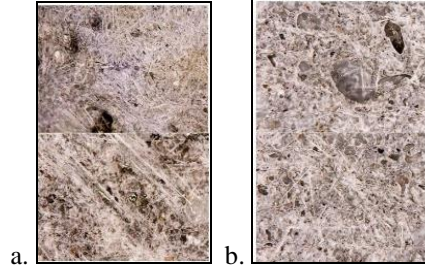
Antibakteriyel özellik üzerinde yapılan ilk çalışma Matsunaga ve ark.'nın (1985), TiO₂-Pt katalistlerini kullanmasıyla birlikte su içindeki mikrobiyal hücrelerin ölümüyle sonuçlanan deneysel çalışmasıdır. Linkous ve ark.'nın (2002) yaptığı bir çalışmada ise bir alg çeşidi olan Oedogonium'un bağlanmasını ve büyümesini engellemek için çimento harcına ağırlıkça %10 oranında TiO₂ eklenmiştir. TiO₂ kullanılmayan numuneye oranla yosun büyümesinde %66'ya varan bir azalma görülmüştür (Chen ve Poon, 2009).

2.2.2.1. TiO₂'nin çimento içeriğine etkisi

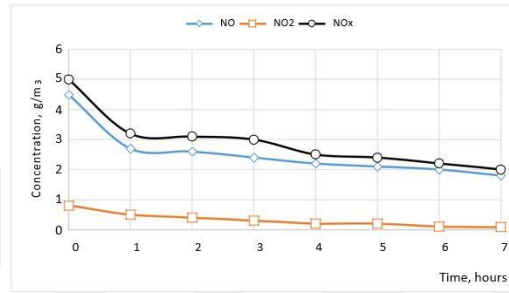
TiO₂ katkının, çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimler ve en iyi verimi almak için yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

- Sopov ve ark. (2020); cam elyaf katkılı beton ürünlerle hava kirleticilerin fotokatalitik olarak uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar şu şekildedir:
 - Beton bileşimine TiO₂ ilavesinin, betonun basınç dayanımını %5-7 oranında arttırdığı, su emilimini %1 oranında azalttığı görülmüştür.
 - TiO₂ nano parçacıklarının eklenmesi, beton yapının sıkıştırılmasına katkıda bulunur ve ince taneli betonun mukavemetinde artış sağlar.
 - Mikroskopik incelemelerde TiO₂ tabakasının varlığı beyaz bir kaplama şeklinde gözlemlenmiştir (Şekil 2.39).
 - Ayrıca TiO₂, erozyon direncini artırmaya ve gözeneklere nüfuz eden kirletici miktarını azaltmaya yardımcı olur.

- Şekil 2.40'da TiO_2 'nin kirletici konsantrasyonundaki değişime etkisi verilmiştir.



Şekil 2.39. Mikroskobik inceleme (Sopov ve ark., 2020)
a. Kontrol numune; b. TiO_2 katkılı numune



Şekil 2.40. TiO_2 'nin kirletici konsantrasyonundaki değişime etkisi (Sopov ve ark., 2020)

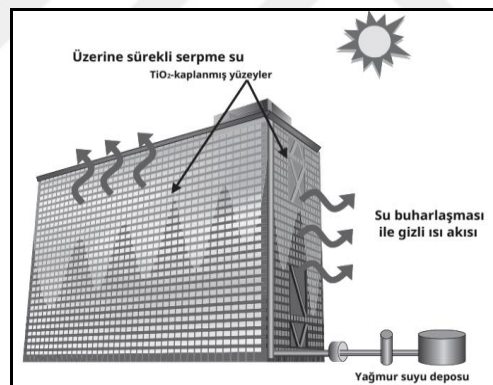
- Nazari ve Riahi'nin (2010) çalışmasında farklı miktarlarda TiO_2 içeren yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı ve su emme katsayısı incelenmiştir. Sonuçlar, çimento hamuruna ağırlıkça %4'e kadar TiO_2 eklenerek numunelerin su geçirgenliğine karşı dayanıklılığının ve direncinin arttığını göstermektedir.
- Nazari ve Riahi (2011), bir başka çalışmada ağırlıkça farklı TiO_2 nano parçacıklara sahip numuneleri incelemiştir. İçeriği %3'e kadar artırıldığında numunelerin eğilme mukavemeti artmıştır. Bunun sebebi TiO_2 varlığında daha fazla hidratlı ürün oluşumudur. Betonun gözenek yapısının iyileştiği gözlemlenmiştir. TiO_2 'nin %3'ten fazla kullanılması, C-S-H jel oluşumu için gereken $Ca(OH)_2$ içeriğinin azalmasına ve beton matrisinde nano parçacıkların uygun olmayan dağılımı sebebiyle eğilme mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Fakat TiO_2 , ağırlıkça önerilen aralıkta kullanıldığı sürece çimentonun yapısını bozmayan bir nano partikül olarak bilinmektedir.
- Salemi ve ark.'nın (2014) çalışmasında, çimentonun %2'lik kısmının nano TiO_2 ile değiştirilmesiyle beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımında %22.71'e

varan artış görülmüştür. Nano partiküller içeren betonların mekanik özelliklerinin ve donma direncinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

- Wang ve ark.'nın (2018) yaptığı bir deneyde TiO_2 nano parçacıklarının çimento hidratasyonunu hızlandırma ve priz süresini azaltmada olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir.

2.2.2.2. Fotokatalitik prekast elemanlarda yüzey yansıtıcılığı ve soğutma özelliği

Bina kabuklarının sürekli olarak zararlı atmosferik kirleticilere maruz kalmasıyla yüzeylerin yansıma özellikleri etkilenir ve opaklaşma eğilimi gösterirler. Fotokatalitik malzeme kullanımıyla zaman içerisinde cephe malzemelerinin güneş yansımaları korunmuş olur. Özellikle beyaz çimentolu prekast elemanlarda bu değer geleneksel portland çimentolara göre oldukça yüksektir. Bir malzemenin güneş yansıtma oranı arttıkça ısıyı tutma oranı düştüğü için bu da soğutma enerjisi ihtiyacını doğrudan azaltır. Bu durum iç mekan termal konforu artırır.



Şekil 2.41. Depolanmış yağmur suyunun TiO_2 kaplı yüzeylerde kullanımı sonucu oluşan enerji tasarruflu sistem (Hashimoto ve ark., 2005)

Binaların soğutulması için son zamanlarda yeni bir yöntem olarak fotokatalizörler önerilmektedir. TiO_2 ile kaplanmış yüzeylere su serpilir. Güneş ışınlarının etkisiyle malzeme hidrofilik hale geleceği için yaklaşık 0,1 mm kalınlığındaki çok ince bir su tabakası, hidrofilik TiO_2 kaplı malzemenin tamamını kaplayabilir ve su tüketimi en aza indirilir. Bina, suyun kendisi tarafından değil, su buharlaştığında ortaya çıkan gizli ısı akışı ile soğutulur (Şekil 2.41). Bu uygulama ile klimalar için tüketilen elektrik harcaması önemli ölçüde azaltılmış olur. TiO_2 kaplı

malzemelerin enerji tasarrufu sağlayan sistemlerin geliştirilmesine de katkıda bulunduğu söylenebilir (Hashimoto ve ark., 2005; Chen ve Poon, 2009).

2.2.3. Fotokatalitik çimentonun verimliliğini etkileyen faktörler

Fotokatalitik malzemelerin etkinliği çevresel koşulların farklılığına ve binanın tasarım, yönelim gibi özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Yüzeyin maruz kaldığı UV radyasyonu, ortamın bağıl nemi, havada bulunan kirleticilerin akış hızı gibi faktörler NO_x emisyonlarının bozunma hızı üzerinde etkilidir. Tüm değişkenler Çizelge 2.3 üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Fotokatalitik malzemelerin verimliliğini etkileyen faktörler

| Fotokatalitik Çimentonun Verimliliğini Etkileyen Faktörler | Açıklama |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çevresel koşullar | Rüzgar (kirletici hızı) Yağış Işık yoğunluğu Bağıl Nem |
| Ortam kirletici yoğunluğu | SO ₂ , NO ₂ , NO, PM, VOC Asit yağmurlarının etkisiyle aşınma eğilimi |
| Bina Yaşı | Zamanla dış ortam koşullarının etkisiyle aşınma eğilimi |
| Bina Yönelimi | Doğu-batıya bakan cephelerde genellikle kuzey-güney cephelerine göre daha yüksek yoğunlukta güneş ışığına maruz kalma |
| Tasarım | -Standart dışı geometrik cephe tasarımlarında, -Su birikmesine ve damlamaya sebep verebilecek cephe ve çatı tasarımlarında, -Güneşliklerin yerleşiminde, -Yüzeyde su akışını kesecek bina girinti ve çıkıntılarının gerekliliğinde, doğru tasarım kararlarının alınması |
| İnşaat- Uygulama | -Drenaj – yağmur suyu uzaklaştırma sistemleri -Montaj hassasiyeti (Derz boşluklarında toz birikmemesi için) |
| Bakım-Onarım | -Yanlış bakım ve temizlik uygulamaları (aşındırıcı yüksek basınçlı su, UV ışını ile teması kesecek boyalar vb) -Kaplamaların yenilenmesi |
| Malzeme | -Kaplama uygulanan alt malzemenin özellikleri -TiO ₂ kaplama kalınlığı veya karışım yüzdesi |

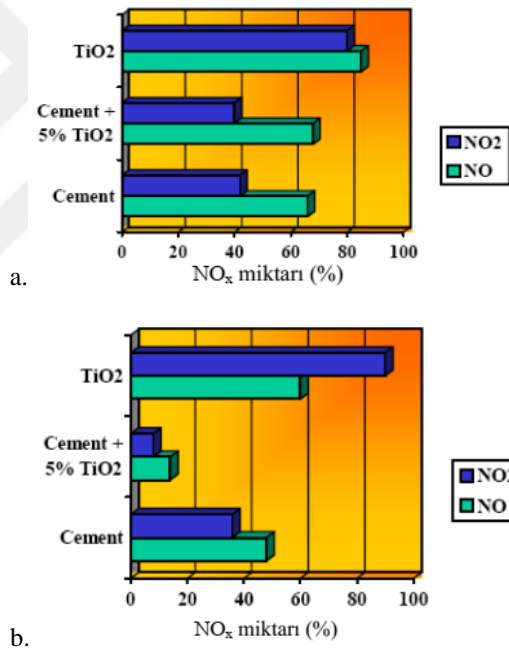
Cardellicchio'nun (2020) Jubile Kilisesi ile ilgili yaptığı çalışmanın incelenmesi sonucunda fotokatalitik malzemelerin verimliliğini etkileyen birtakım unsurlar maddeler halinde değerlendirilmiştir.

'Dives in Misericordia' Kilisesi (Jubile Kilisesi) Roma'da, İtalcementi firmasına ait fotokatalitik çimento ile üretilmiş prekast beton panellerle inşa edilen ilk

binadır (Şekil 2.42). Temiz, beyaz ve parlak bir görünüm için çimento içeriğine TiO_2 parçacıkları ve beton içerisine carrara mermer parçaları karıştırılmıştır. Şekil 2.43'te kullanılan çimentonun NO_x giderimi ile ilgili test sonuçları verilmiştir (Cassar ve ark., 2003).



Şekil 2.42. 'Dives in Misericordia' Kilisesi

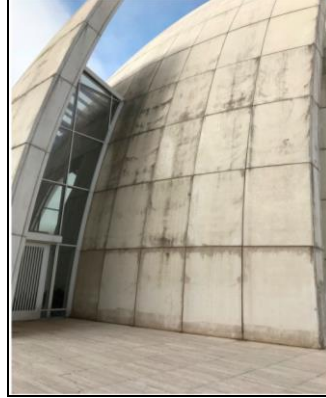


Şekil 2.43. a. Numunelerin karanlık ortamda NO_x miktarındaki değişimi (Cassar ve ark., 2003);

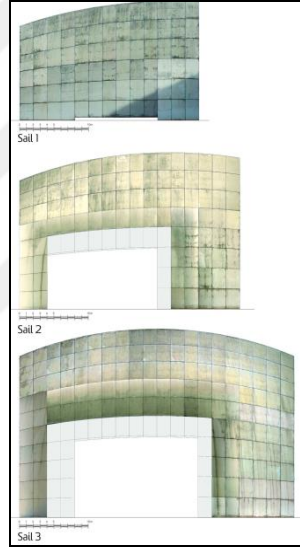
b. Numunelerin UV ışığı altında NO_x miktarındaki değişimi (Cassar ve ark., 2003)

Bina inşa edildikten 16 yıl sonra, betonun kendi kendini temizleme ve renk koruma özellikleri tasarım ihtiyaçlarını karşılamamaya ve cephede kirlilikler görülmeye başlamıştır. Yapılan bir dizi araştırma, saha incelemesi ve kimyasal analizler sonucunda kirlenme sebebinin malzemenin fotokatalitik özelliğinden kaynaklı olmadığı, içeriğindeki TiO_2 parçacıklarının hala aktif olduğu fakat bir takım tasarım, uygulama ve

bakım çalışmalarından kaynaklanan hatalar sonucunda renk değişimleri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.44. 'Dives in Misericordia' Kilisesi cephe bozulmaları (Cardellicchio, 2020)



Şekil 2.45. 'Dives in Misericordia' Kilisesi cephe bozulma analizi (Cardellicchio, 2020)

Kirliliğin tespiti Şekil 2.44 ve Şekil 2.45'deki görsellerle ifade edilmiştir. Cephedeki kirliliğin temel sebepleri ise aşağıda özetlenmiştir. Ayrıca yerel çevre koşulları göz önüne alındığında cephenin puzolanik tozlara maruz kaldığı görülmüştür. Puzolanik tozun kimyasal bileşimi ve aşındırıcı etkisi nedeniyle toprağın ağırlıklı olarak volkanik özellikler barındırdığı bölgelerde TiO_2 parçacıklarının fotokataliz özellikleri azalabilir.

- Eğrisel duvarların geometrik şeklinden kaynaklı olarak düz duvarlara kıyasla üst kısımlarında toz birikmesi ve yağmurun sağlıklı bir şekilde uzaklaştırılmaması sebebiyle kirleri yıkayamaması, yine eğrisellikten

kaynaklı olarak dış bükey kısımların daha çok aşınarak TiO₂ parçacıklara zarar vermesi

- Daha önceden yapılan cephe bakım çalışmasının (hidrofilik etkiyi artırmak için boya uygulaması ve üzerine yüksek basınçlı su ile yıkama) fotokatalitik malzemeye zarar verdiği
- Drenaj sisteminin doğru şekilde uygulanmaması sebebiyle suyun zeminden uzaklaştırılamaması ve biyolojik kirlenmeye sebebiyet vermesi
- Puzolanik tozun TiO₂ tarafından oksitlenememesi

Bu araştırma tasarımcıların ve mühendislerin, fotokatalitik malzemeler kullanılması durumunda, özellikle farklı geometrik tasarıma sahip projelerde, yağmur suyunun bina yüzeyini nasıl yıkadığını dikkatlice düşünmeleri gerektiğini göstermektedir. Ayrıca olası kirlenmelerde fotokatalitik prekast yüzeylerde yapılacak bakım çalışmalarının malzemeye zarar vermeyecek nitelikte olmasına dikkat edilmelidir (Cardellicchio, 2020).

Bu çalışmadan yola çıkarak fotokatalitik malzemelerin kullanıldığı yapılarda olası kirlenmelerin sebeplerine; çevresel faktörlere, tasarım ve uygulama aşamalarına dikkat çekilerek açıklamalar getirilebilir.

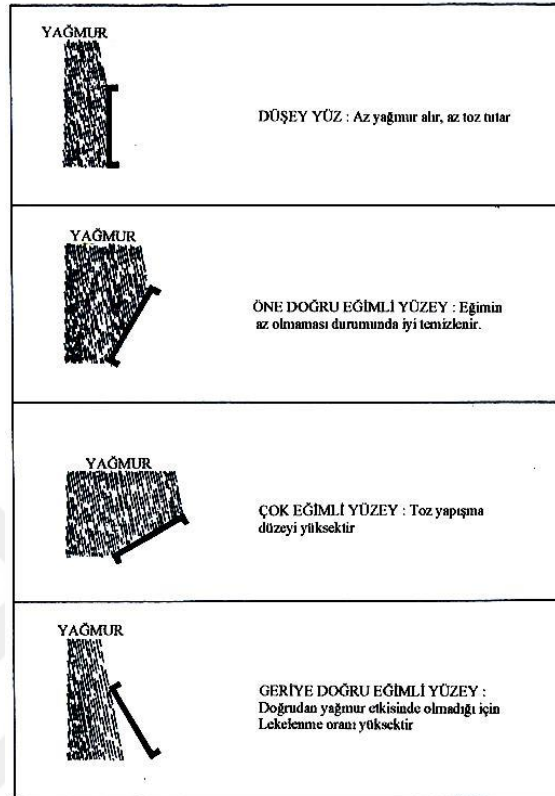
2.2.3.1. Fotokatalitik verimliliği etkileyen tasarım kriterleri

Göçer'in (2005) ve Cardellicchio'nun (2020) çalışmasına göre yüzeyde oluşabilecek kirlenme ve fotokatalitik verimliliğin artırılması için düşünülmesi gereken unsurlar; yüzey eğimi, panel formu ve yüzey dokusu dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

- **Yüzey eğimi**

Yapı kabuklarında yağmur en temel ve ideal doğal temizleyicidir. Ancak ne kadar kendini temizleyen elemanlar kullanılsa da olası bir kirlenmede en temel sebeplerden biri tasarıma ve inşaat uygulamalarına bağlı olarak yağmur suyunun yapıdan uzaklaştırılamama durumudur. Panellerde eğim azaldıkça suyun akış hızı da azalmakta ve bununla birlikte kirlerin birikme oranı artmaktadır (Göçer, 2005)

(Şekil 2.46). Suyu uzaklaştırmak için paneller arasındaki bağlantı tipinin seçimi de belirleyicidir.



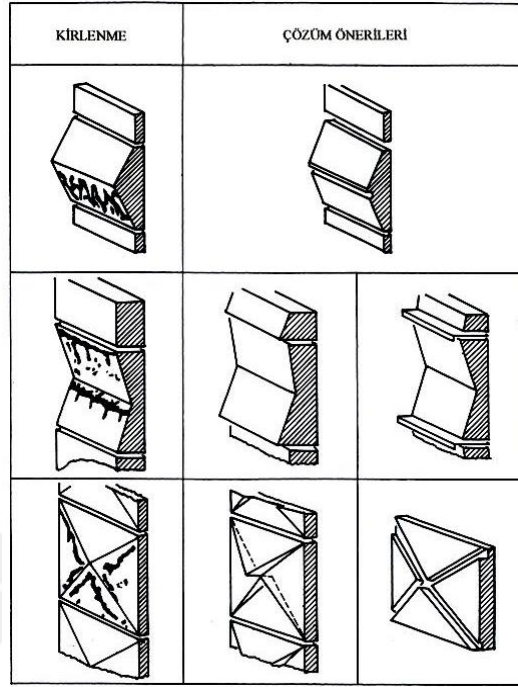
Şekil 2.46. Prekast cephe panellerinde eğime bağlı kirlenme durumları (Cansun, 1980)

- **Panel Formu**

Prekast beton panellerde kalıp özelliklerine ve üretim tekniğine bağlı olarak istenilen formda prefabrik elemanların üretimi mümkündür. Bu elemanları oluşturan farklı bölümler farklı yıkanma durumu gösterebilir, girinti ve çıkıntıların birleşim bölgelerinde toz birikebilir. Fotokatalitik aktivite nedeniyle yüzeyde biriken nitrat (NO_3^-), TiO_2 'nin ışıkla ve havadaki kirleticilerle temasını azaltır. Sonuç olarak yüzey durulanmadığı sürece kirletici temizlenme oranı da zamanla azalma eğilimi gösterir. Şekil 2.47'de önerildiği gibi kalıp teknolojisi yağmur suyunu yönlendirecek detay çözümleri sunmalıdır ve paneller arası derzlerde süreklilik sağlanmalıdır (Göçer, 2005).

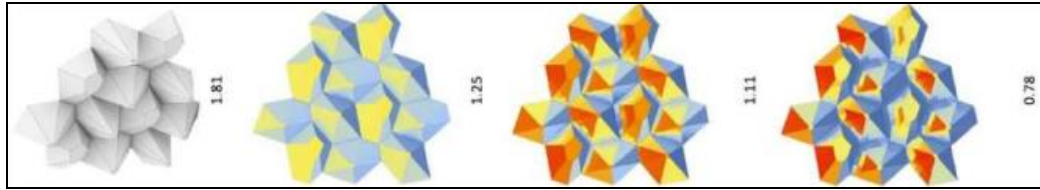
Cephe elemanlarında kir birikmesini engelleyecek çözümlerle birlikte, gölgelenme kontrolü, panel yüzeyinde rüzgar hızı kontrolü ve maksimum UV ışını

etkileşimi sağlanması mümkündür. Farklı geometrik tasarımlarla panel yüzey alanının artırılması ve panel kalıbının geliştirilmesi ile fotokatalitik verimlilik artırılabilir.

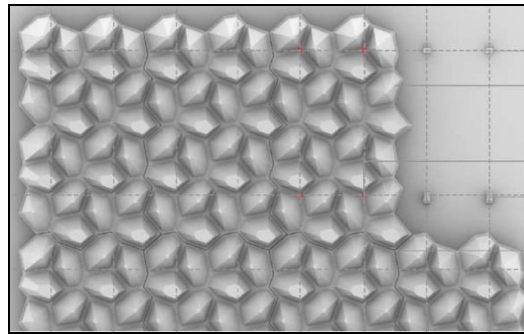


Şekil 2.47. Prekast cephe panellerinin formuna bağlı kirlenme ve çözüm önerileri (Ayaydın, 1988)

Sakthivel (2019), çalışmasında farklı geometrilerin güneşlenme miktarlarını belirleyip, yüzey alanını artırarak özel bir panel tasarlamıştır (Şekil 2.48, Şekil 2.49).

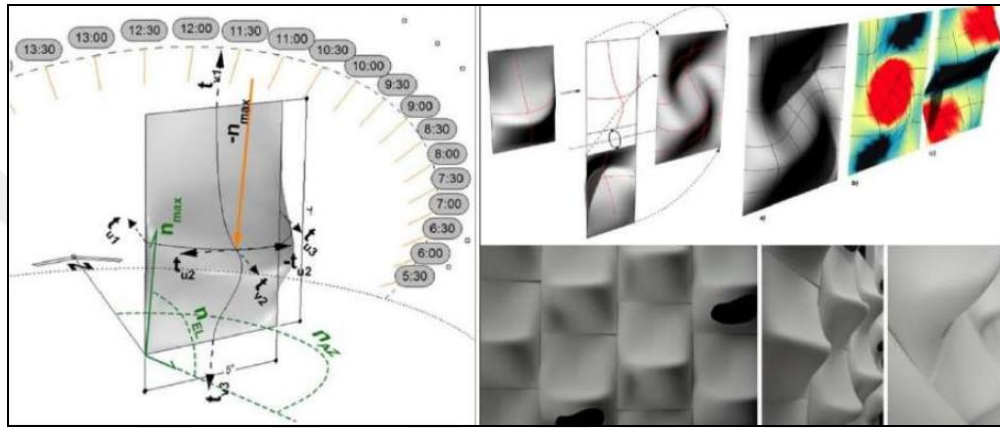


Şekil 2.48. Maksimum yüzey alanı için kış, ekinoks ve yaz aylarına ait güneşlenme simülasyonu (Sakthivel, 2019)



Şekil 2.49. Duvara monte edilmiş cephe sisteminin yerleşimi (Sakthivel, 2019)

Benzer bir tasarım stratejisi Nikolov ve Fox'un (2015) çalışmasında da mevcuttur. Yüzey alanı aynı boyutlardaki düz panele kıyasla %113 artırılmıştır ve önerilen panelin yüzey alanının %76.45'i, aynı boyutlarda düz panelden daha yüksek radyasyona maruz kalmaktadır. Şekil 2.50'de panel yüzeyinin detayları ve güneşlenme simülasyonu, Şekil 2.51'de ışınlamanın düşük olduğu yerlerde boşlukların açılması sonucu oluşan panelin perspektif görünümü verilmiştir.



Şekil 2.50. Tasarım parametreleri ve panel detayı (Nikolov ve Fox, 2015)



Şekil 2.51. Düşük ışınlama bölgelerinin kaldırılması sonucu oluşan panel tasarımı (Sakthivel, 2019)

Fotokatalitik kendini kendini temizleyen yüzeylerde hareketli bir tasarım söz konusuysa ve suyun doğru şekilde uzaklaştırılması sağlanamıyorsa belli aralıklarla bu bölgeler suyla temizlenmelidir. İtalyan çimento üreticisi İtalcementi, ortalama 3 yıl aralıklarla bu bakımı yapmanın bina ömründe bakım maliyetlerinden tasarruf sağlayacağını da belirtmektedir (Çizelge 2.4). Bu şekilde temizleme sıklığının, ortamın agresiflik düzeyine ve binanın yüzey bitişine de bağlı olduğunun altını çizmek gerekir (İtalcementi Group, 2020).

Çizelge 2.4. İtalcementi tarafından önerilen yüzey bakımı (İtalcementi Group, 2020)

| | Yatay Yüzeyler | Dikey Yüzeyler |
|--------------------|-----------------------------------------------|-----------------|
| Perde Duvar | | Her yıl |
| Metal | Her hafta - denizlikler Her yıl - düz çatı | Her yıl |
| Çimento (Tx Aktif) | Her yıl | Her 3 yılda bir |

- **Yüzey Dokusu**

Beton yüzeyi ne kadar dokulu ve gözenekli olursa, yüzeyde tortu birikme ve lekelenme olasılığı da o kadar yüksek olur. Gözenekliliğin artması su emme oranını da artırarak yüzeylerin kir tutması kolaylaşır. Parlak bitişli veya pürüzsüz yüzeylerde ise toz tanecikleri yüzeye daha zor yapışmaktadır (Poon ve Cheung, 2007; Hanson, 2014). Özellikle farklı yüzey eğimine sahip cephe elemanlarında bölgenin iklimsel koşullarına ve çevre şartlarına da bağlı olarak aşınmalar görülebilir. Bu da yüzeyde pürüzlülüğün artmasıyla birlikte malzemenin zarar görmesine sebep olabilir.

2.2.3.2. Fotokatalitik verimliliği etkileyen çevresel koşullar

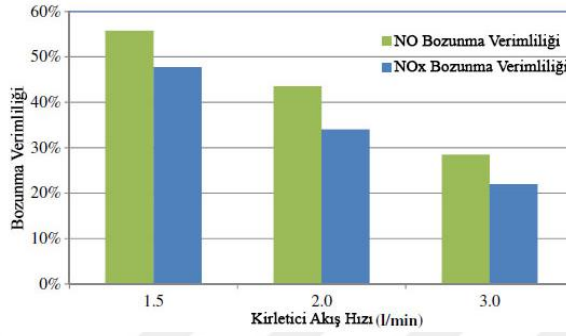
Fotokatalitik malzemelerin etkileri üzerindeki en önemli faktörler dış ortam koşullarıdır. Rüzgar ve bağıl nem başta olmak üzere olumsuz hava şartlarına karşı toleransları oldukça düşüktür. Fotokatalitik verimlilik ışık yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artmakla birlikte yağmur, yüzeyin temiz kalması ve rengini koruması için gereklidir.

- **Rüzgar**

Kirletici akış hızı belirli bir yüzeyden belirli bir zamanda geçen hava kirleticilerin hacmi olarak tanımlanır. Atmosferdeki kirleticilerin akış hızı belirlenirken rüzgar hızı dikkate alınır. Fotokatalitik tepkimelerin en iyi verimde gerçekleşmesi için tepkime süresi kadar kirleticilerin yüzeye temas etmesi gerekmektedir ve bunun için hava akışına ihtiyaç vardır. Belli bir orana kadar akış hızındaki artışlar kirleticilerin fotokatalitik bozunmasını mg/s/m cinsinden olumlu etkiler. Bu sınırdan itibaren akış hızı arttıkça kirleticilerin yüzeye temas süresi azalacağı için bozunma hızı da azalır ve

daha düşük indirgeme verimliliği ile sonuçlanır (Anusree ve Baby, 2017; de Melo ve Trichês, 2012).

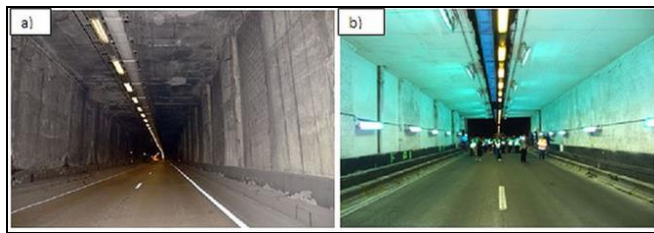
Hassan ve ark. (2012), TiO₂ katkılı asfalt kaplamaların fotokatalizi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada kirletici akış hızının fotokatalitik verimliliğe etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.52’de görüldüğü gibi akış hızı arttıkça verimlilik azalmıştır.



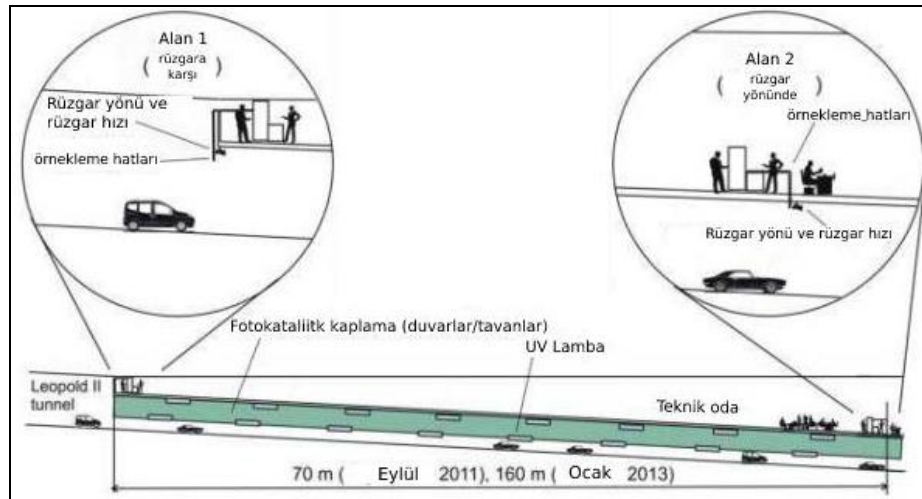
Şekil 2.52. Akış hızı ve fotokatalitik bozunma arasındaki ilişki (Anusree ve Baby, 2017)

Akış hızını dış ortamda kontrol etmek laboratuvar ortamına göre daha zordur. Bu da yol ve kaldırımlarda, tünellerde, binalarda fotokatalitik malzemelerin daha düşük performans göstermesine sebep olur. Prekast cephe panellerinin tasarlanmasında rüzgar hızını azaltmak ve kirleticilerin temas süresini uzatmak dikkat edilmesi gereken noktalardır (Sakthivel, 2019). Fotoaktif cephe yüzeylerinde bina kabuğunun yüzey pürüzlülüğü; balkon, panjur, saçak ve her türlü eklenti, rüzgar basıncının azaltılmasına ve rüzgar akış alanının değiştirilmesine yardımcı olur (Lignarolo ve ark., 2011).

Belçika Brüksel'deki yüksek trafik yoğunluğuna sahip Leopold II tüneline fotokatalitik çimento esaslı kaplama uygulanmış ve yapay UV aydınlatma sistemi kullanılmıştır (Şekil 2.53). Rüzgara karşı ve rüzgar yönünde ölçümler yapılarak rüzgarın etkisi belirlenmek istenmiştir (Şekil 2.54).



Şekil 2.53. Leopold Tünel II test sahası uygulama öncesi ve sonrası (Boonen ve Beeldens, 2013)



Şekil 2.54. Leopold Tüneli II test sahası deneysel kurulum şeması (Gallus ve ark., 2015)

Yapılan ölçümler sonucunda kirleticilerin yüzeyde kalma süresini artırmak için tünelin ortalama rüzgar hızının düşük olması gerektiği öne sürülmüştür. Aynı zamanda nem, UV ışık yoğunluğu gibi diğer etkenlerde incelenmiştir. Ortalama bağıl nemin %60'ın altında olması gerektiği ve ideal UV ışık yoğunluğunun 10 W/m^2 civarında yüksek seviyede olması önerilmiştir (Gallus ve ark., 2015).

- **Yağmur**

Kirleticilerin fotokataliz sonucu parçalanması yüzey temizliği için yeterli değildir. Kirlerin malzeme yüzeyinden giderilmesi için su ile temas etmesi gerekir. Doğal yollarla yağış alarak yüzeyde biriken nitrat gibi yan ürünler özel bakım gerektirmeden kolaylıkla temizlenebilir fakat yıllık yağış miktarının düşük olduğu bölgelerde belirli aralıklarla basit yüzey temizliği gerekebilir. Kir temizlenmedikçe malzemenin UV ışınları ile teması kesileceği için fotoaktivitesi de zamanla azalacaktır. Literatür çalışmaları iki ayda bir yüzeyin yıkanması ile fotokatalitik malzemenin aktif kalabileceğini ileri sürmektedir (Sakthivel, 2019).

- **Işık yoğunluğu**

Bina yüzeylerine gelen radyasyon miktarı cephenin yönüne göre değişir. Ortalama radyasyon seviyeleri yaz aylarında en yüksek ve kış aylarında en düşük

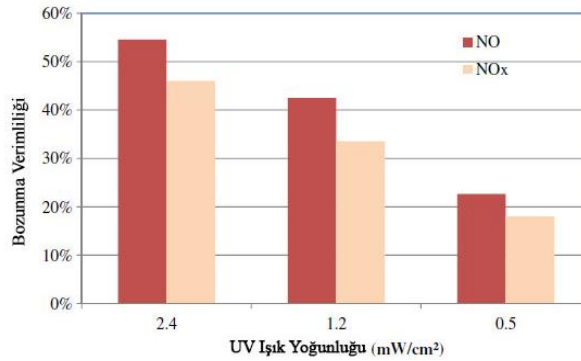
seviyelerdedir. Binaların güney cepheleri yıl boyunca en yüksek radyasyona maruz kalan alanlardır. Cepheleme göre maruz kalınan radyasyon miktarının sıralaması yapılacak olursa Güney>Batı>Doğu>Kuzey şeklindedir (Sakthivel, 2019). Kuzey cephelerde TiO_2 'in foto aktivasyonunu tamamlaması için daha fazla zamana ihtiyacı vardır (Maggos ve ark., 2007; Sakthivel, 2019). Bu bilgiler ışığında fotokatalitik malzeme tüm yüzeylere uygulanabileceği gibi amaca yönelik olarak sadece yüksek güneş ışınımına sahip bölümlere de uygulanabilir. Örneğin kirliliğin yoğun olduğu bölgelerde havadaki NO_x 'lerin temizlenmesi amacıyla yapılan cephe uygulamalarında, yüksek verimlilik için güney ve batı cepheler tercih edilebilir. Meksika'daki Manuel Gea Gonzalez Hastane Binası buna örnek gösterilebilir (Altın ve Orhon, 2014).

Çizelge 2.5. Işık yoğunluğuna bağlı olarak kirletici bozunma sonuçları

| Kirletici | Işık yoğunluğu (W/m^2) | Bozulma üzerindeki etkisi | Kaynak |
|-----------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| NO_x | 10-40 W/m^2 | 10'dan $25 W/m^2$ 'ye kadar kirletici bozunmasında önemli artış, 25- 40 W/m^2 arasında sınırlı artış | (de Melo ve ark., 2012) |

UV ışınımına göre kirletici bozunmasındaki değişimler Çizelge 2.5'de verilmiştir. Fotokatalitik malzemenin yüzeyinde %30'dan fazla kirletici bozunması elde etmek için ışık yoğunluğu $10 W/m^2$ 'den yüksek olmalıdır. Birçok çalışmada $10 W/m^2$ 'nin altındaki UV değerleri düşük ışınım olarak kabul edilmiştir (Sakthivel, 2019).

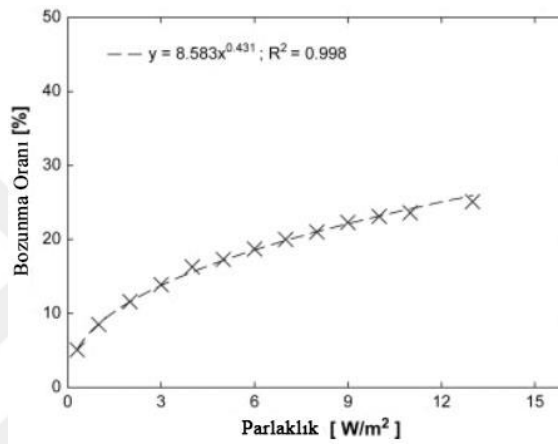
Hassan ve ark.'nın (2012) TiO_2 kaplı asfalt kaplamaların fotokatalitik verimliliği üzerine yürüttükleri çalışmada, hazırlanan numunenin UV yoğunluğuna göre performansı laboratuvar ortamında ölçülmüştür. Sonuç Şekil 2.55'te gösterilmiştir.



Şekil 2.55. UV yoğunluğuna göre NO_x bozunma verimliliği (Anusree ve Nimisha, 2017)

Yüksek UV seviyelerinde daha fazla aktif halde TiO_2 bulunur (de Melo ve Trichês, 2012). Herrmann ve ark.'nın (2007) çalışmasına göre fotokatalitik bozunma hızı, belirli bir eşik değere kadar ışık yoğunluğu ile doğru orantılı iken eşikten sonra yoğunluğun karekökü ile orantılıdır.

Hüsken ve ark. (2009) tarafından yapılan bir başka benzer çalışmaya göre fotokatalitik malzemenin kullanıldığı bir ortamda UV yoğunluğu arttıkça, NO bozunma oranı da artma eğilimi göstermiştir (Şekil 2.56).



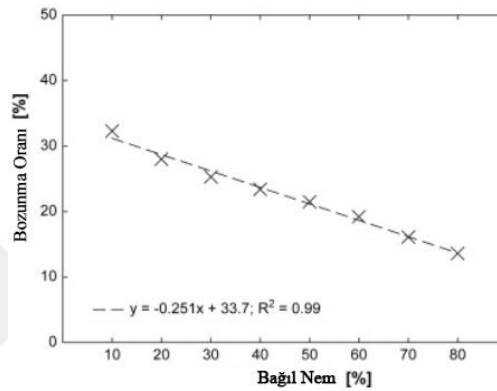
Şekil 2.56. UV yoğunluğu- NO_x bozunma oranı ilişkisi (Hüsken ve ark., 2009)

- **Bağıl nem**

Bağıl nemin fotokatalitik malzemelerin verimliliği üzerindeki olumsuz etkisi, su moleküllerinin yüzeydeki aktif TiO_2 bölgelerine NO_x temasını engellemesi ile açıklanır. Bu nedenle yıllık bağıl nemin %25 ile %40 arasında olduğu daha kuru bölgeler fotokatalitik reaksiyon için en uygun koşullara sahiptir (Anusree ve Baby, 2017). Literatürde yer alan çoğu çalışmada ortalama %50, maksimum %60-70 civarında bağıl nem oranı önerilir. Daha yüksek seviyelerde sonuç düşük NO_x bozunması ile sonuçlanacaktır (Şekil 2.57). Bununla birlikte, hidroksil radikallerinin üretimi için belirli bir bağıl nem seviyesinin gerekli olduğu, ancak bunun düşük bir seviyede kalması gerektiği bilinmelidir. Literatürde bağıl nemin NO_x oksidasyonuna etkisi konusunda benzer çalışmalar Çizelge 2.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 2.6. Bağıl nemin NO_x oksidasyonuna etkisi üzerinde çalışmalar

| Açıklama | Kaynak |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| %50'ye kadar artan bağıl nem ile ortamdaki NO bozunması artmıştır. Daha fazla artış NO bozunmasını iyileştirmemiştir. | (Devahasdin ve ark., 2003) |
| %70'e kadar artış sağlanırken daha yüksek bağıl nem seviyeleri önerilmez. | (Ballari ve ark., 2011) |
| En yüksek bozunma oranı %25 bağıl nem seviyesinde gözlemlenmiştir. | (Dylla ve ark., 2011) |
| %10-70 aralığında artan bağıl nem oranı ile NO'nun bozunma oranlarında doğrusal bir düşüş gözlemlenmiştir. | (Hüsken ve ark., 2009) |

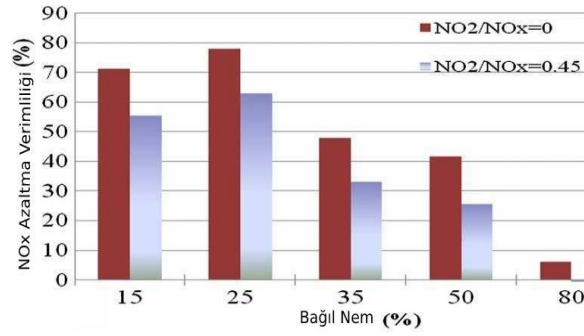


Şekil 2.57. Bağıl nemin kirletici bozunma hızı üzerindeki etkisi (Hüsken et al., 2009).

Açıklanan parametreler ışığında hakim çevre koşullarının NO_x'in bozunma performansı için oldukça önemli olduğu sonucuna varılır. Fotokatalitik malzemeler güneş ışınımının yüksek olduğu, hava hareketinin az olduğu ve bağıl nem değerlerinin düşük olduğu bölgelerde daha iyi fotokatalitik verimlilik sağlayacaktır. Bu üç faktörün saha koşullarında aynı anda optimize edilmesi zor olmakla birlikte; sonuçlar, uygulama yapılacak bölgedeki koşulların dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (de Melo ve Trichês, 2012).

- Çevredeki hava kirleticiler

Hassan ve ark. (2012) çalışmasına göre TiO₂, kararsız NO₂ gazlarına karşı daha reaktiftir. Dolayısıyla NO₂'nin NO_x'e oranı fotokatalitik verimliliği etkileyecektir. Asfalt kaplamalar üzerinde yapılan çalışmaya göre Şekil 2.58'de gösterildiği gibi NO₂/NO_x oranlarındaki artış, NO_x bozunma verimliliğinde bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 2.58. NO₂/ NO_x oranının NO_x bozunma verimliliğine etkisi (Hassan ve ark., 2012)

Literatürde fotokatalitik malzemeler için genellikle NO_x emisyonları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Fotokatalitik bozunma NO_x'lerin yanı sıra SO₂, PM10, VOC (uçucu organik bileşikler) gibi farklı kirleticiler üzerinde de etkilidir. Fakat bu etki NO_x'lerde olduğu kadar yüksek değildir. Hassan ve ark. (2012) çalışmasına göre %31-55 oranında NO_x uzaklaştırma verimliliği elde edilirken, %4-20 oranında SO₂ uzaklaştırma verimliliği elde edilmiştir.

2.2.4. Avrupa'da fotokatalitik prekast eleman kullanımı

Avrupa'da kendini temizleme ve duman yeme özelliğe sahip beton esaslı hafif prekast uygulamalarında, beton bileşeninde TX Active çimento yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özel çimento İtalcementi Araştırma ve İnovasyon Merkezi'nde geliştirilmiştir ve özel formülasyonu sayesinde fotokatalitik aktivite gösterir. 'TX Active' Avrupa'da yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin fotokatalitik aktivitesini belirtmek için kullanılan bir kalite etiketidir. Kendi kendini temizleme özelliğine sahip beton ilk kez 1996 yılında inşaatına başlanan, Roma'daki 'Dives in Misericordi' Kilisesi'nin (Jubilee Kilisesi) yapımında kullanılmış ve etkinliği doğrulanmıştır. Ardından Chambéry'deki 'Cité de la Musique et des Beaux-Arts' binasında kullanılarak uzun süre izlenmiştir (Spasiano ve ark., 2015). Sonraki süreçte farklı tedarikçiler tarafından ürün Avrupa geneline yayılmış ve çeşitli projelerde kullanılmıştır. İtalya'da 2006 yılı içerisinde çimento esaslı malzemelerle üretilen fotokatalitik yüzeyler yaklaşık 400,000 m², sadece yatay uygulamalarda (parke blokları, endüstriyel kaldırımlar, beton kaplama vb.) toplam yüzey alanı yaklaşık 200,000 m²'dir (Cassar ve ark., 2007).

- **Cité de la Musique et des Beaux-Arts – Chambéry**

2000 yılında inşa edilen Fransa Chambéry’de bulunan sanat okulu binası kendini temizleme özelliğine sahiptir (Şekil 2.59). Bina cephelerinde gri betondan üretilen paneller mevcuttur ve beton içeriğinde TX Active çimento kullanılmıştır. Farklı cephelerdeki renk değişimini izlemek için dört ana noktaya dağıtılan 191 ölçüm noktası belirlenmiş ve kalorimetrik izleme yapılmıştır. Otuz aylık izlemeden sonra sonuçlar, doğrudan güneş ışığı almayan kuzey cephede bile neredeyse önemli bir kirlenme olmadığını göstermektedir. Tüm cephelerde ana renk korunmuştur. Bu iki binada halen kalorimetrik ölçümler devam etmektedir (Spasiano ve ark., 2015; NPCA, 2022) .



Şekil 2.59. Chambéry - Cité de la Musique et des Beaux-Arts (Batiserf, 2022)

- **Hotel de Police Bordeaux – Fransa**

Merkezde bulunan bina cephe kaplaması, kirlenmelere karşı fotokatalitik çimento ile üretilmiş prefabrik cephe panellerinden oluşmaktadır (Şekil 2.60). Beyaz mermer agregalı çift katmanlı paneller parlak bir yüzeye sahiptir. Toplamda 750 panel (700’ü beyaz) 5,400 m²’lik bir alanı kaplamaktadır (İtalcementi Group, 2022b).



Şekil 2.60. Hotel de Police Bordeaux – Fransa

- **NövAmpère Konut Projesi- Milano**

İtalyanın Milano kentindeki NövAmpère konut projesinde, bina cepheleri fotokatalitik çimento içeren prekast panellerle kaplanmıştır (Şekil 2.61, Şekil 2.62). 2,700 metrekarelik dış duvarlara uygulanan teknoloji, yaklaşık 54 benzinli otomobilin (Euro 6) veya 40 dizel otomobilin (Euro 6) emisyonlarını giderebilecek fotokatalitik etkiye sahiptir. Aynı zamanda hava kalitesinin iyileştirilmesinde yaklaşık 243 ağaç dikmeye eşdeğerdir ve "duman yiyen" cephe olarak adlandırılmaktadır (İtalcementi Group, 2022d).



Şekil 2.61. NövAmpère Konut Projesi fotokatalitik cephe panelleri montaj aşaması (Dalila ve Ingeino, 2020)



Şekil 2.62. NövAmpère Konut Projesi fotokatalitik cephe panelleri (Dalila ve Ingeino, 2020)

- **Carvico Spor Salonu (BG)- Bergamo**

Carvico'da inşa edilen spor salonunun dış kabuğu, yapının işlevinden hareketle insan kas liflerinin şeklinden esinlenilerek biyomimikri ilkesiyle tasarlanmıştır (Şekil 2.63).



Şekil 2.63. Bergamo Carvico Spor Salonu (Grillini, 2020)

Biyomorfik cephe elemanları fotokatalitik çimento kullanılarak; prefabrik, kendini temizleyen beton panellerden üretilmiştir (Şekil 2.64, Şekil 2.65). Farklı yüzey bitirme teknolojileri ile termoset reçineler yüzeye uygulanarak, fotokatalitik beton üzerinde neredeyse plastik malzemelerinkine eşit bir pürüzlülük katsayısı elde edilmiştir (İtalcementi Group, 2022e; Grillini, 2020).



Şekil 2.64. Bergamo Carvico Spor Salonu fotokatalitik prefabrik cephe elemanları montaj aşaması (Grillini, 2020)



Şekil 2.65. Bergamo Carvico Spor Salonu fotokatalitik prefabrik cephe elemanları uygulama sonrası (Grillini, 2020)

- **HeidelbergCement Genel Merkezi- Almanya**

HeidelbergCement'in yeni genel merkez binasında yaklaşık 6,000 m²'lik alanda fotokatalitik beton prefabrik elemanlar kullanılmıştır (Şekil 2.66). Bu da potansiyel olarak 480-600 arasında ağaca eşdeğerdir. Amaç, işlek bir cadde üzerinde bulunan yeni binanın çevresindeki NOx içeriğini önemli ölçüde azaltmaktır (İtalcementi Group, 2020).



Şekil 2.66. HeidelbergCement Genel Merkez Binası (HeidelbergCement, 2020)

- **İtalcementi Araştırma İnovasyon Merkezi**

İtalya'nın ilk LEED Platinum sertifikasına sahip projede farklı özelliklerde TioCem markalı fotokatalitik çimento kullanılmıştır. TX Active teknoloji bu çimento; cephe kaplamasında prekast panellerde, binanın dışındaki beton döşemede ve yapısal olmayan beton elemanların (iç ve dış mekan mobilyaları, sanatsal çalışmalar vb.) yapımında kullanılmıştır (Şekil 2.67). Ayrıca bazı duvarlarda İtalcementi laboratuvarlarında üretilen ve ilk kez Şanghay'daki Expo 2010 İtalyan Pavilyonu'nda kullanılan şeffaf beton kullanılmıştır (İtalcementi Group, 2022c).



Şekil 2.67. İtalcementi Araştırma İnovasyon Merkezi (Frances, 2013)

- **Chiesa San Giovanni XXIII kilisesi – Bergamo**

Oldukça sade bir mimari yapıya sahip Bergamo Hastanesi'nin yeni kilisesi Style Comp ve Avrupa İnovasyon Ödülü finalisti işbirliği ile geliştirilen TX Active 'duman yiyen' fotokatalitik betondan yapılmış bir dizi ince sütunla çevrilidir (Şekil 2.68) (Arcvision, 2014).



Şekil 2.68. Chiesa San Giovanni XXIII Kilisesi ve cephe elemanları (Arcvision, 2014)

- **Expo Milano 2015 - İtalyan Pavilyonu**

2015 Milano Evrensel Sergisi'nde yer alan İtalyan Pavilyonu dış kabuğu ve iç mekanın kısıtlı bölümü, dallı bir ormanın şekillerini hatırlatan karmaşık bir tasarımdan oluşmaktadır (Şekil 2.69, Şekil 2.70). Tasarım için yenilikçi ve sürdürülebilir, kendini temizleyen bir beton üretilmiştir. 9,000 metrekarelik dış yüzey TX Active teknolojiye özel işlenebilirliğe sahip biyodinamik çimento ile üretilen beton prefabrik elemanlardan oluşur. Birbirinden farklı 750'den fazla düz ve kavisli panel vardır. Ayrıca harç, kısmen Carrara mermerinin artıklarından gelen ve geleneksel beyaz çimentolara üstün bir parlaklık veren %80 geri dönüştürülmüş agrega kullanımını gerektirir (ArchDaily, 2015).



Şekil 2.69. İtalyan Pavilyonu biyodinamik fotokatalitik cephe panelleri (Luigi, 2022).



Şekil 2.70. İtalyan Pavilyonu iç mekan (Luigi, 2022)

- **Vimercate Enerji Parkı**

Eko sürüdürülebilirlik ve enerji tasarrufu konuları üzerine düşünülerek tasarlanmış Vimercate Enerji Parkı Projesi'ndeki prekast cephe kaplamalarında TX Active çimento kullanılarak daha iyi bir hava kalitesi hedeflenmiştir (Şekil 2.71). Dış mekan zemin kaplamalarında ise, İtalcementi firması tarafından özel olarak üretilen yüksek drenaj özelliğine sahip fotokatalitik beton bloklar kullanılmıştır. Projede yer alan binalarda geleneksel binalara kıyasla enerji tüketiminde %40'a varan azalma sağlanmış ve LEED Platinum sertifikasına sahip olmuştur (İtalcementi, 2022f).



Şekil 2.71. Vimercate Enerji Parkı (İtalcementi, 2022f)

- Arnavutluk'ta inşa edilen Magnet Konut Merkezi, Fransa Toulouse'da bulunan Saint-Agne Immobilier Genel Merkezi, Fransa Charles de Gaulle Havaalanı'nda bulunan Air France Genel Merkez Binası, Fransa'da bulunan 1970'lerden kalma binanın modernize edilmesiyle yeni bir görünüm kazanan 'Le Bon Coin' Binası, İtalya Guidizzolo sanayi bölgesinde yer alan FM Elektronik Fabrika Binası ve İtalya Milano'daki eko-teknolojik bir kompleks olan Vodafone Towers, fotokatalitik prekast elemanların kullanıldığı yapılara verilebilecek diğer örneklerdir. Sırasıyla Şekil 2.72, Şekil 2.73, Şekil 2.74, Şekil 2.75, Şekil 2.76, Şekil 2.77'de görünümleri verilmiştir. Air France Genel Merkez Binası, uçaklar tarafından üretilen yoğun hidrokarbon konsantrasyonlu ortamda bulunduğu için cephe kaplamasında fotokatalitik malzeme tercih edilmiştir. FM Elektronik Fabrika Binası'nda fotokatalitik çimento ve prekast elemanlar cephe kaplamalarında, kolon ve sütunlarda, saçaklarda ve çatıda olmak üzere yapının birçok bölümünde kullanılmıştır. Vodafone Towers'da ise fotokatalitik cephe kaplamasıyla birlikte cephedeki suyun doğru şekilde tahliye edilmesini sağlayan detaylar mevcuttur.



Şekil 2.72. Magnet Konut Merkezi
(HeidelbergCement Group, 2022a)



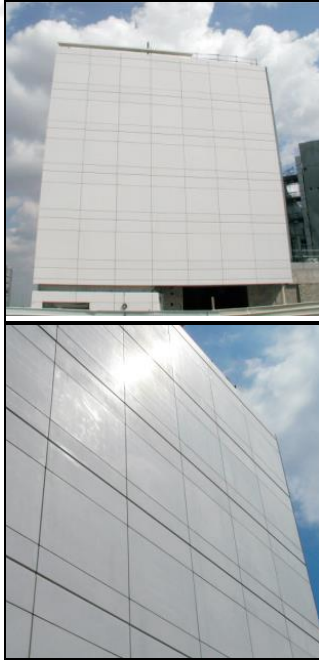
Şekil 2.75. Le Bon Coin (HeidelbergCement
Group, 2022b)



Şekil 2.73. Saint-Agne Immobilier Genel
Merkezi (Kozlowski, 2022)



Şekil 2.76. FM Elektronik Fabrika Binası
(Arketipo, 2020)



Şekil 2.74. Air France Genel Merkez Binası
(İtalcementi Group, 2022b)



Şekil 2.77. Vodafone Towers (İtalcementi,
2022g)

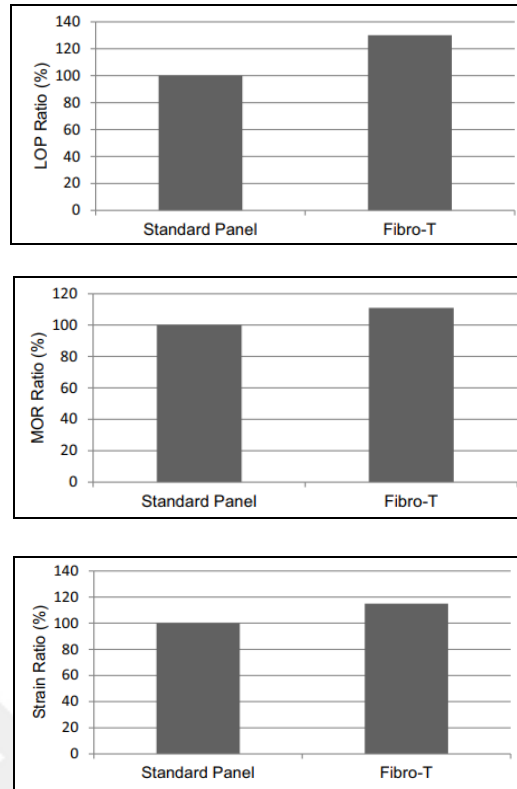
2.2.5. Türkiye’de fotokatalitik prekast eleman kullanımı

Fotokatalitik çimentonun hafif prekast elemanlarda kullanımı henüz Türk yapı sektörü içerisinde çok fazla yer edinmemiştir. Bilinen tek örnek İzmit’te yer alan RUP Projesine ait kontrol binasıdır ve inşaatı 2014 yılında tamamlanmıştır. Yapının cephe kaplamasında projeye özel olarak çalışılan kendini temizleyen GRC paneller kullanılmıştır (Şekil 2.78). Fotokatalitik kendini temizleyen panellerin tercih edilmesinin başlıca nedeni ise ortam koşullarıdır. Rafinerinin tam ortasında konumlandığı için, binanın NO_x ve SO_x emisyonları gibi son derece zorlu ortam koşullarına dayanabilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.78. Tüpraş RUB Projesi Kontrol Merkezi (Delibaş ve Maraşlı, 2015)

Malzeme cephede 5,000 m²’lik zeminde 3,000 m²’lik alanda kullanılmıştır. Dış cephe kaplamasında kullanılan panellerin kalınlığı 30 mm, zemindekiler ise 40 mm’dir. Malzemenin etkinliğini kontrol etmek amacıyla panellerin beyazlık değeri düzenli olarak Hunter Lab ölçeğiyle ölçülmektedir. Aynı zamanda şiddetli patlamalara karşı dayanıklı olması için panellerin üretiminde yüksek performanslı beton (HPC) kullanılmıştır. Su/çimento oranı düşük tutulmuştur, maksimum agrega boyutu ise normal panellerden %30 daha düşüktür. Panellerin parlaklığı normal GRC elemanlardan daha yüksektir. Parlaklık için mikron boyutunda kalsit eklenmiştir. Fibrobon tarafından standart GRC panellerle fotokatalitik özel üretim panellerin performansları Şekil 2.79’daki gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.79. Standart panellerin LOP, MOR ve gerinim oranları açısından kendini temizleyen (Fibro-T) panellerle karşılaştırılması (Delibaş ve Maraşlı, 2015)

GRC panellere kendini temizleme özelliği Çimsa'nın ürettiği TiO_2 katkılı özel çimento ile kazandırılmıştır. Fotokatalitik etkinliğin testleri ISO 22197 standartına göre belirlenmiştir. Çimentonun etkinlik testleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde yapılmıştır. Testler, kendini ve havayı temizleyen beyaz çimento ile üretilen GRC panellerin, belirli bir süre içinde normal beyaz çimentoya göre 4 kat daha fazla NO_x moleküllerini emdiğini göstermiştir. Çizelge 2.7'de Çimsa nano katkılı çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir. Kendini temizleyen panellerin üretim aşaması Şekil 2.80'de gösterilmiştir (Delibaş ve Maraşlı, 2015).

Çizelge 2.7. Çimsa nano katkılı çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri (Delibaş ve Maraşlı, 2015)

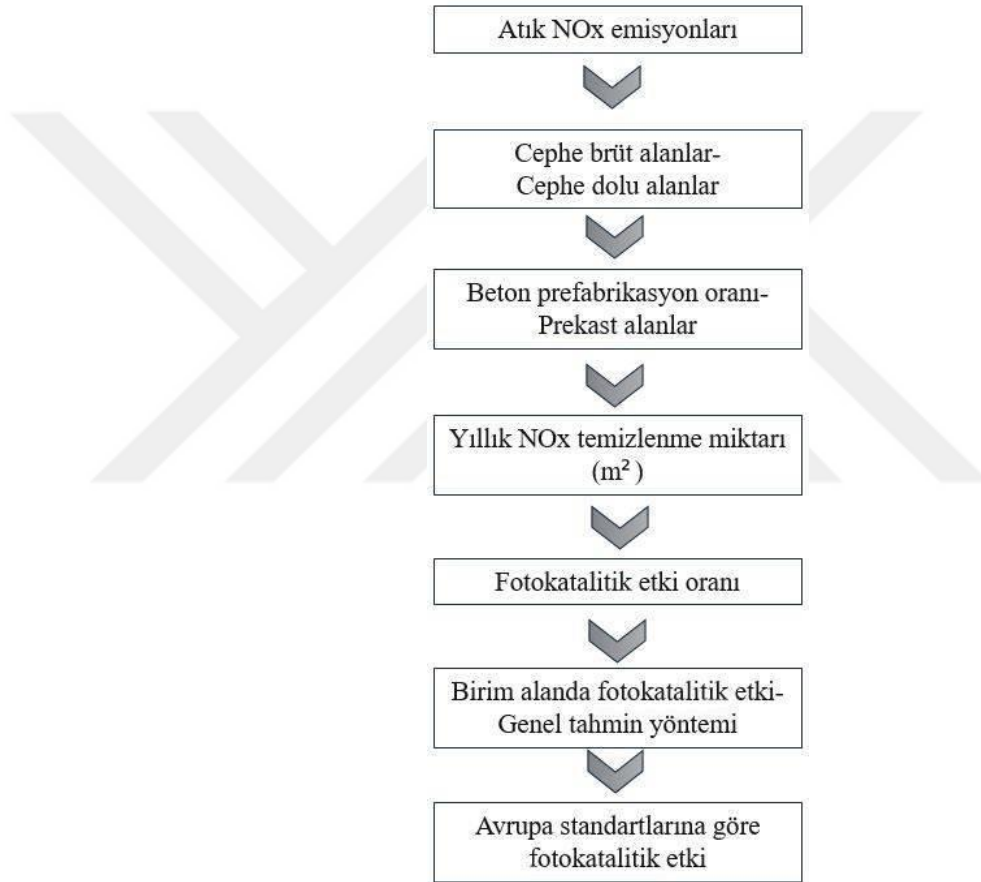
| Chemical Composition (%) | | Physical and Mechanical Properties | |
|--------------------------|-------|------------------------------------|------|
| Insoluble Residue | 0,18 | 2 Compressive Strength (MPa) | 30,1 |
| | 21,6 | | |
| | 4,08 | 28 Compressive Strength (MPa) | 53,2 |
| | 0,3 | Density (g/) | 3,03 |
| CaO | 65,6 | Initial Setting Time (min) | 90 |
| MgO | 1,03 | Blaine Fineness (/g) | 5200 |
| | 3,26 | Whiteness (Hunter Lab Y Scale) | 88.2 |
| Loss on Ignition | 3,2 | | |
| | 0,17 | | |
| | 0,46 | | |
| Cl ⁻ | 0,008 | | |



Şekil 2.80. Kendini temizleyen fotokatalitik panellerin üretim aşaması
(Delibaş ve Maraşlı, 2015; Maraşlı, 2022)

3. FOTOKATALİTİK PREKAST CEPHE ELEMANLARIN ATMOSFERİK KİRLİLİĞE ETKİSİ- ANKARA İL ÖRNEĞİ

Ankara ili örnek alınarak yapılan çalışmada NO_x emisyonu azaltımına ilişkin fotokatalitik prekast eleman kullanım önerisi getirilmiş ve atmosfere salınan yıllık emisyon miktarı için Ankara İli Temiz Hava Eylem Planı'nda (THEP) yer alan emisyon envanteri kullanılmıştır. Çalışma 7 aşamadan oluşmaktadır ve Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Ankara il örneği çalışma aşamaları

- Ankara iline ait yıllık emisyon envanteri verilerine ulaşılarak önce hane başına ve m² başına düşen evsel ısınma kaynaklı NO_x emisyon salınımı bulunmuş, buradan hareketle 2021 yılı içerisindeki tüm yapılaşma alanına düşen ısınma kaynaklı NO_x salınımı belirlenmiş ve diğer kaynaklar (sanayi, trafik) THEP emisyon envanteri sonucundaki oranlar korunarak hesaplanmıştır. Birim alana düşen emisyonun evsel ısınmadan başlayarak bulunmasının sebebi THEP'de yer alan çalışma bölgesinde

tüm emisyon kaynaklarına ait alan bilgisinin net olmaması ve birim alana inilememesidir. THEP'e göre sadece ısınma kaynaklı emisyon hesabı bölümünde değerlendirilen konut sayısı bilinmektedir.

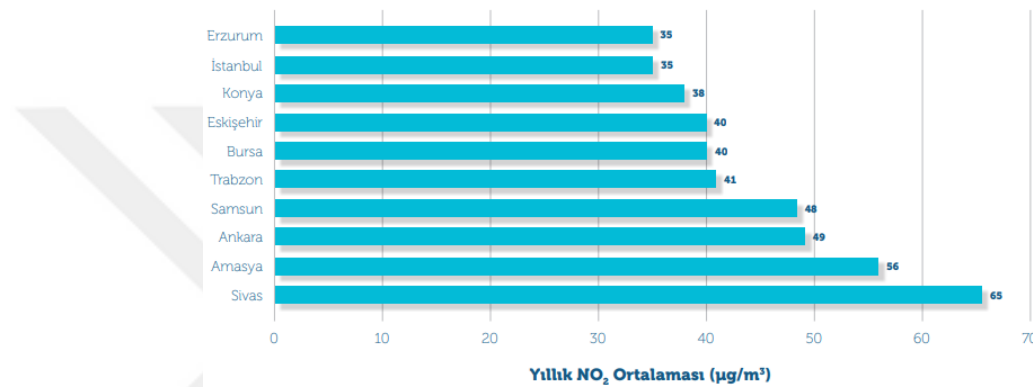
- Fotokatalitik malzemelerin UV ışınımına maruz kalması gerektiği için, Ankara ili 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alanların ortalama bir daire büyüklüğü üzerinden cephe brüt alanları ve cephe dolu alanları hesaplanmıştır.
- Türkiye'deki beton prefabrikasyonun durumu ve inşaat sektörü içerisindeki oranı hakkında bilgi verilmiş buna göre cephe dolu alanları üzerinden prekast alanlar bulunmuştur.
- Fotokatalitik betonun birim alanda (m^2) ve birim zamanda (h) NO_x uzaklaştırma miktarları ile ilgili kaynaklar gösterilmiş ve ortalama bir değer belirlenmiştir. Buna göre Ankara ilinin gündüz uzunlukları dikkate alınarak yıllık toplam uzaklaştırılan NO_x miktarı bulunmuştur.
- Fotokatalitik etkinin Ankara ili yıllık NO_x emisyonlarının giderilmesi üzerindeki payı hesaplanmıştır.
- Prefabrikasyon oranına bağlı olarak birim alandaki fotokatalitik bozunma miktarı bulunmuştur. Bulgular üzerinden genel formül oluşturulmuştur.
- Prefabrikasyonda Avrupa standartlarına ulaşılması durumunda fotokatalitik malzeme kullanımı sonucu etki oranı tekrar hesaplanmıştır.

3.1. Ankara İli Hava Kalitesi

Ankara'da 1950'lerden itibaren nüfusun hızlı bir şekilde artmaya başlamasıyla, 1990-2000 arası İstanbul'dan sonra 2. en yüksek nüfus artış oranına sahip şehir olmuştur (Çiçek ve Doğan, 2005). Kentleşmenin düzensiz ve denetimsiz olması, sanayi tesislerinin inşaatında yer seçimine dikkat edilmemesi ve bacalarda kontrolsüz emisyon salınımları, kalitesiz yakıtların iyileştirilmeden kullanılması, endüstriyel tesislerde yanlış yakma teknikleri kullanılması, konut sayısının artmasıyla ısınma kaynaklı emisyon artışları, kentleşmeyle birlikte araç sayısı ve egzoz emisyonu sorunu gibi sebeplerle 1970'lere gelindiğinde kirlilik kamusal sağlığı tehlikeye atacak şekilde riskli seviyelere ulaşmıştır. Daha sonrasında hava kirliliği önleme amaçlı yönetmelikler çıkarılmış, çeşitli örgütler kurulmuştur (Sümer, 2014).

Ankara ili topoğrafik olarak çanak şeklinde olması sebebiyle yıllık ortalama rüzgar hızı oldukça düşüktür. Hakim rüzgar yönlerinde çok katlı yapılaşmanın artması, şehir içi ulaşımında merkezde kesişen iki ana hattın kilitlenmesi ve her yıl artan trafik yoğunluğu egzoz gazı emisyonlarını artırmaktadır (ÇED, 2019). İklimsel olarak yarı-kurak karasal iklim hakimdir. Yıllık ortalama bağıl nem miktarı %60'dır (Çiçek ve Doğan, 2005).

Yıllık ulusal NO₂ limiti 40 µg/m³ olmasına rağmen Ankara'da bu limitin %22 oranında aşıldığı görülmektedir (Şekil 3.2) (KaraRapor, 2021).



Şekil 3.2. 2020 yılına ait NO₂ ortalaması en yüksek iller (KaraRapor, 2021)

Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi atmosferik kirleticiler arasında NO_x emisyonu üç büyük şehirde toplam %32.1'lik orana sahipken bu oranın %7.2'si Ankara iline aittir. Yani ülke genelinde yıllık atmosfere salınan NO_x emisyonunun %22.4'ü Ankara'nın hava kirliliğinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3.1. Türkiye'de büyük şehirlerin ulusal emisyon payları (Elbir ve ark., 2000)

| | İstanbul | Ankara | İzmir | Total of three cities | All others |
|-----------------|----------|--------|-------|-----------------------|------------|
| PM | 18.6 | 6.4 | 4.5 | 29.5 | 70.5 |
| SO _x | 23.1 | 6.9 | 2.8 | 32.8 | 67.2 |
| NO _x | 19.4 | 7.2 | 5.5 | 32.1 | 67.9 |
| VOC | 38.3 | 12.9 | 8.0 | 59.7 | 40.3 |
| CO | 25.3 | 8.3 | 7.0 | 40.6 | 59.4 |

Hava kirliliğinin azaltılmasına yönelik politikalar ve eylem planları oluşturulabilmesi için her ilde hava ölçüm istasyonları kurulmuştur. Böylelikle partikül madde (PM₁₀, PM_{2.5}), karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), azot oksitler

(NO_x, NO₂, NO), kükürt dioksit (SO₂) ve ozon (O₃) gibi hava kirleticiler saatlik olarak ölçülmektedir. Bu ölçümler günlük, mevsimsel ve yıllık olarak değerlendirilmektedir. Ankara'da farklı ilçelere ait dokuz adet ölçüm istasyonu bulunmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Ankara ili hava ölçüm istasyonları (ÇED, 2019)

| İSTASYON YERLERİ | İSTASYON TÜRÜ (Isınma/Trafik/Sanayi) | HAVA KİRLETİCİLERİ | | | | | |
|------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------|----|----------------|----|----|
| | | SO ₂ | NO _x | CO | O ₃ | HC | PM |
| Bahçeli | | X | X | X | | | X |
| Çankaya | | X | X | X | X | | X |
| Demetevler | | X | X | X | | | X |
| Siteler | | X | X | X | X | | X |
| Kayaş | | X | | | | | X |
| Keçiören | | X | X | | X | | X |
| Sincan | | X | X | | | | X |
| Bahçeli | | X | X | X | | | X |

Ankara ili hava ölçüm istasyonlarına ait yıl içinde en yüksek ve en düşük NO_x seviyeleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Ankara ili 2019 yılı hava ölçüm istasyonları (ÇED, 2019)

| İstasyon Adı | Mevcut NO _x (ort) | | µg/m ³ |
|--------------|------------------------------|---------|-------------------|
| | Aralık | Ay | |
| Bahçelievler | Max | Şubat | 92.50 |
| | Min | Aralık | 21.17 |
| Demetevler | Max | Mart | 108.08 |
| | Min | Aralık | 27.80 |
| Keçiören | Max | Kasım | 87.98 |
| | Min | Şubat | 9.10 |
| Sincan | Max | Kasım | 140.38 |
| | Min | Haziran | 40.40 |

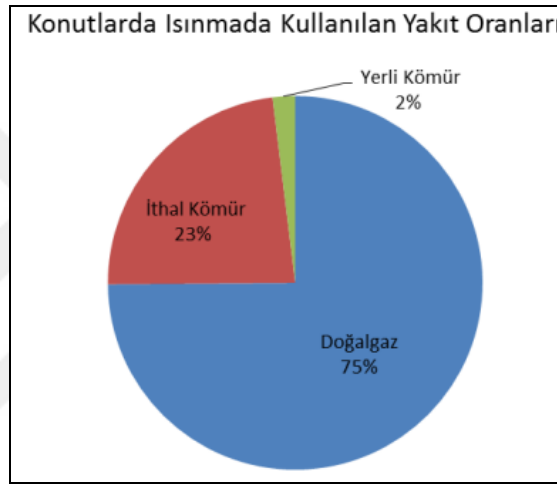
3.2. Ankara İli Emisyon Envanteri

Hava kirliliğinin kontrolünü sağlamak için kirletici türlerinin ve emisyon oranlarının bilinmesi esastır. Belirli bir bölgeye ait hava kirliliği ile ilişkili tüm bilgilerin sistematik bir şekilde toplanması ve değerlendirilmesi emisyon envanteri olarak adlandırılır.

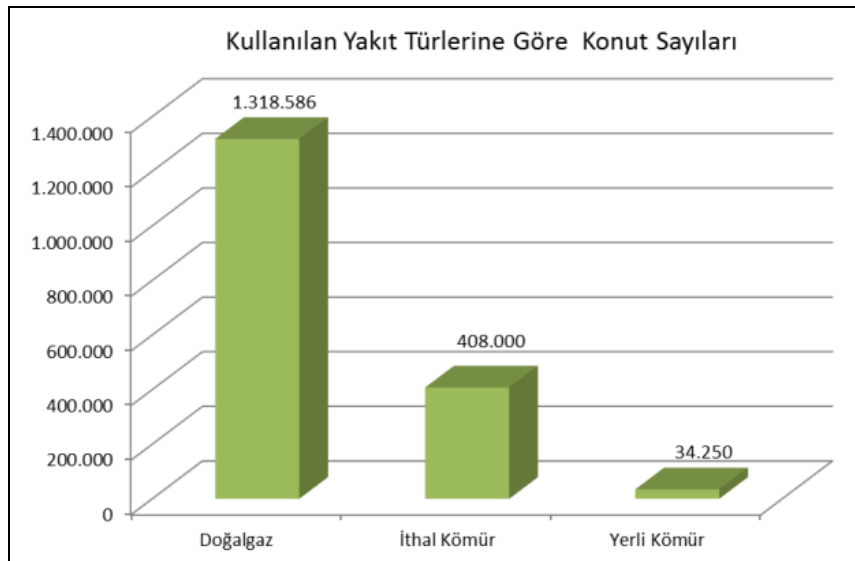
Ankara ili 2020-2024 Temiz Hava Eylem Planı içerisinde yıllık emisyon envanteri hesaplama bilgileri verilmiştir. Emisyon envanteri çıkarılırken evsel ısınma, trafik kaynaklı ve sanayi kaynaklı olma üzere üç ana etken ele alınmıştır.

- **Evsel Isınma**

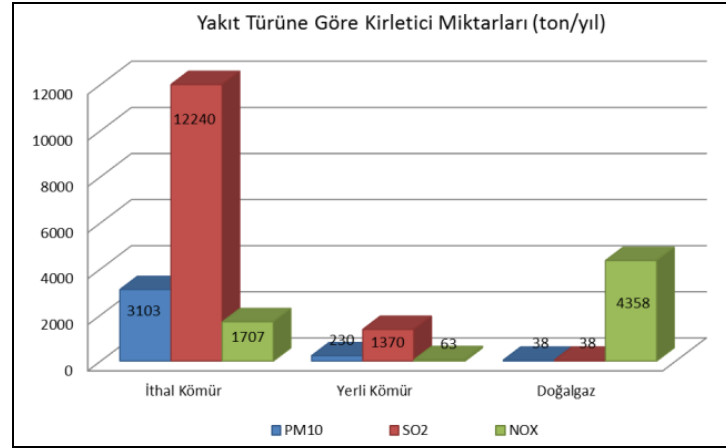
THEP'e göre evsel ısınma kaynaklı emisyon hesabı için ilde bulunan konut sayısı, konutların ısınma türleri, kullanılan yakıtların miktarı, oranları, türü, aylara göre dağılımı ve emisyon faktörleri dikkate alınmıştır. Veriler Ankara Büyükşehir Belediyesi Kent Bilgi Sistemi ve TÜİK'den alınmış, aynı zamanda ilgili kurum ve kuruluşlarla da iletişime geçilip gerekli veriler temin edilmiştir. Ankara'da konutların ısınma türleri %75 doğalgaz, %25 kömür ve diğerleri olarak ayrılır (Şekil 3.3). Emisyon Faktörleri için EMEP/EEA Emisyon Envanteri Rehber Kitabı (2009) kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Evsel ısınma için kullanılan yakıt oranları (THEP, 2020).



Şekil 3.4. Yakıt türlerine göre konut sayıları (THEP, 2020).



Şekil 3.5. Yakıt türlerine göre kirletici miktarları (THEP, 2020).

Isınma kaynaklı kirletici miktarlarının kullanılan yakıt türü ile ilişkisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Buna göre doğalgaz kullanımı ile NO_x emisyonlarının arttığı, kömür kullanımı ile de PM10 ve SO₂ değerlerinin arttığı söylenebilir (THEP, 2020).

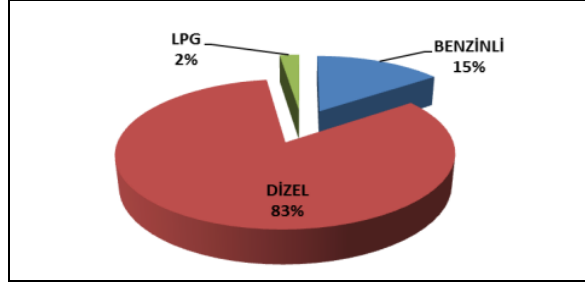
Ankara İli 2020-2024 Temiz Hava Eylem Planı içerisinde, ısınma kaynaklı emisyon envanteri hesaplanırken toplam 1,760,836 konutun değerlendirildiği ve atmosfere yılda 6,128 ton NO_x salınımı olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.4). Buna göre Çizelge 3.4'te gösterildiği gibi hane başına düşen ısınma kaynaklı atmosfere salınan NO_x miktarı 3,480 gramdır.

Çizelge 3.4. Hane başına ve birim alana düşen ısınma kaynaklı NO_x emisyon salınımı

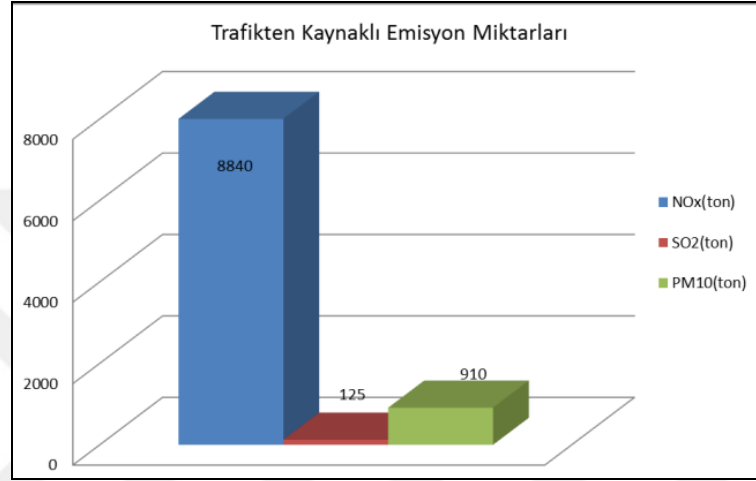
| Alan (plan) | Atmosfere salınan NO _x emisyon miktarı (ısınma kaynaklı) |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1,760,836 konut için | 6,128 ton = 6,128,000,000 g (1 ton=1,000,000 g) |
| 1 konut için (ort.125 m ²) | 3,480 g |
| 1 m ² için | 27.84 g |

- **Trafik**

Trafik kaynaklı envanter hesaplamasında TÜİK'den araç sayıları, kullanılan yakıt türleri ve yol uzunluklarına göre tüm veriler değerlendirilerek yakıt miktarları hesaplanmış, böylece yakıtların emisyon faktörlerine göre toplam emisyonu bulunmuştur. Ankara ili trafik kaynaklı tüketilen yakıt miktarlarının oranı Şekil 3.6'da, trafik kaynaklı emisyon miktarları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ankara ili trafik kaynaklı tüketilen yakıt miktarlarının oranı



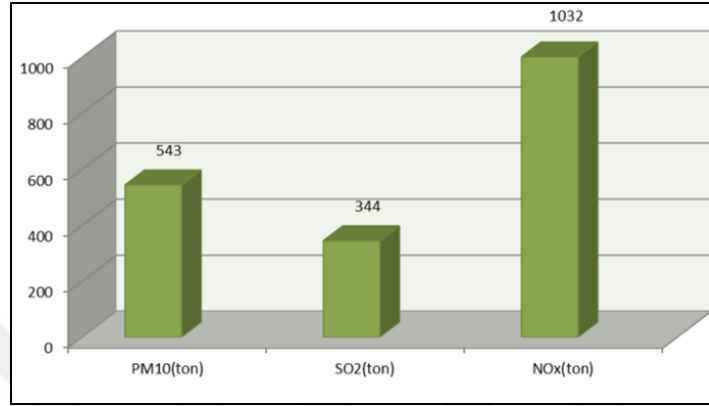
Şekil 3.7. Ankara ili trafik kaynaklı emisyon miktarları

- **Sanayi**

Ankara ili 2020-2024 Temiz Hava Eylem Planı kapsamında il genelinde emisyon etkisi olabilecek tüm büyük, orta ve küçük ölçekli tesisler tespit edilmiştir. Ankara'da 11 adet Organize Sanayi Bölgesi, yüksek kirleticiliğe sahip yaklaşık 20 adet büyük ölçekli endüstriyel tesis ve yaklaşık 3.000 adet küçük ve orta ölçekli sanayi üretim tesisi bulunmaktadır. Gerekli formlar endüstriyel işletmeler tarafından doldurularak; yakıt türleri, miktarları, tesisin yıllık çalışma süresi, firma sektörü, NO_x, SO₂, PM10 emisyonları gibi birçok bilgi edinilmiştir. THEP içerisinde yer alan emisyon hesaplamasına göre 3 adet OSB'ye (Ostim OSB, ASO 1. OSB, İvedik OSB) ve küçük-orta ölçekli işletmelere ait toplam üretim miktarları ile yakıt kullanımı verileri, emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu veriler neticesinde toplam sanayi kaynaklı emisyon miktarı verilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Ankara ili sanayi kaynaklı emisyon miktarları (ton/yıl)

| Ankara İli Sanayi Emisyon Miktarları | PM ₁₀ | SO ₂ | NO _x |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Endüstri emisyon ölçümleri | 543 | 344 | 1032 |

**Şekil 3.8** Ankara ili sanayi kaynaklı emisyon miktarları (THEP, 2020)

Sanayi tesislerinde doğalgaz kullanımının artmasıyla katı ve sıvı yakıt kullanımı azalmış, böylelikle SO₂ ve PM₁₀ kirleticilerinin yoğunluğu da aynı oranda azalmıştır. Doğalgaz kullanımındaki artışla orantılı olarak NO_x oranında da yükselme gözlenmiştir. Sanayi kaynaklı emisyonların dağılımı Şekil 3.8’de verilmiştir.

- **Toplam Emisyon**

Yapılan hesaplamalar ile Ankara ilinin kirlilik miktarları hesaplanmış olup, en yüksek emisyon miktarı 16,000 ton ile NO_x’lere aittir. Toplam emisyon üzerinde %45.7’lik orana sahiptir. NO_x kaynakları arasında en büyük pay ise trafiğe aittir.

Çizelge 3.6. Ankara ili 2021 yılı yapı ruhsatı verilen konut ve diğer alanlar

| İl adı | Bina sayısı | Toplam yüzölçüm | Daire sayısı | Konut kullanım alanı | Konut dışı kullanım alanı | Ortak kullanım alanı |
|--------|-------------|------------------|--------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Ankara | 5,618 | 9,164,850 | 32,271 | 4,888,883 | 2,466,563 | 1,809,404 |

2021 yılında yapı ruhsatı verilen alanlara göre, ısınma kaynaklı NO_x emisyonu referans alınarak diğer NO_x kaynaklarının emisyon miktarları bulunmuştur. Çizelge 3.7’de Ankara ilinin tüm yapılaşma alanına göre THEP içerisinde hesaplanan yıllık

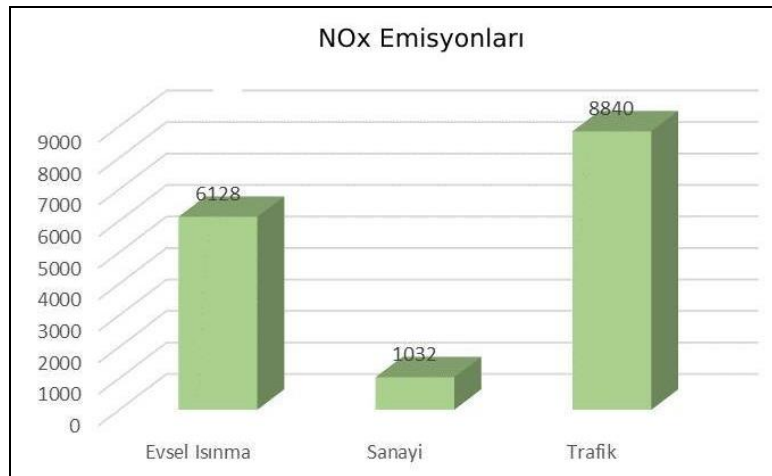
toplam emisyon miktarları verilmiştir. Buna göre kaynaklar arasındaki emisyon oranları dikkate alınarak Çizelge 3.8 oluşturulmuştur. Çizelge 3.8, Ankara ilinin Çizelge 3.6'da gösterilen 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alanlara göre hesaplanan yıllık toplam NO_x emisyonu miktarını vermektedir (9,164,850 m² alanın yaydığı NO_x emisyon salınımı). Bundan sonra yapılacak hesaplamalarda bu çizelge dikkate alınacaktır (Çizelge 3.8). NO_x emisyonlarının kaynaklara göre dağılımı Şekil 3.9'da, oransal dağılımı ise Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Ankara ili tüm yapılaşma alanına düşen yıllık toplam emisyon miktarları (THEP, 2020)

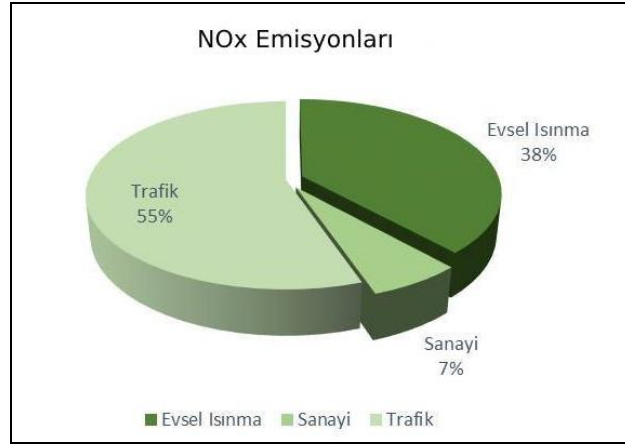
| Ankara İli Emisyon Envanteri | PM10 | SO ₂ | NO _x |
|------------------------------|-----------|-----------------|-------------------|
| Sanayi Kaynaklı | 543 | 344 | 1,032 |
| Evsel Isınma Kaynaklı | 3,371 | 13,648 | 6,128 |
| Trafik Kaynaklı | 910 | 125 | 8,840 |
| TOPLAM | 4,824 ton | 14,117 ton | 16,000 ton |

Çizelge 3.8. Ankara ili 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alana düşen yıllık emisyon miktarları

| Ankara İli Emisyon Envanteri | NO _x |
|------------------------------|----------------------------------|
| Sanayi Kaynaklı | 42,969,028 g (42.9 ton) |
| Evsel Isınma Kaynaklı | 255,149,424 g (255.1 ton) |
| Trafik Kaynaklı | 368,068,033 g (368 ton) |
| TOPLAM | 666,186,485 g (666.1 ton) |



Şekil 3.9. Ankara ili NO_x emisyonları (THEP, 2020)



Şekil 3.10. Ankara ili NO_x emisyon dağılımı (THEP, 2020)

3.3. Ankara İli Mevcut Prefabrik Uygulamalarında Fotokatalitik Malzeme Kullanımı

Prekast alanı bulabilmek için öncelikle cephe brüt alanı ve dolu-boş alanlar bilinmelidir. Prefkast alanın hesaplanması için öncelikle brüt cephe alanından pencere alanları çıkarılıp dolu alan bulunmalıdır.

3.3.1. Prefabrik yapı ve cephe alanının hesaplanması

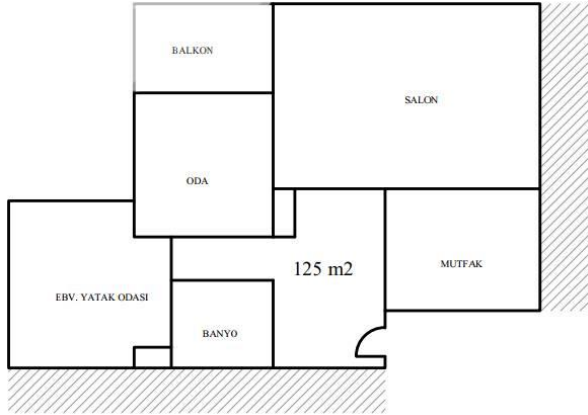

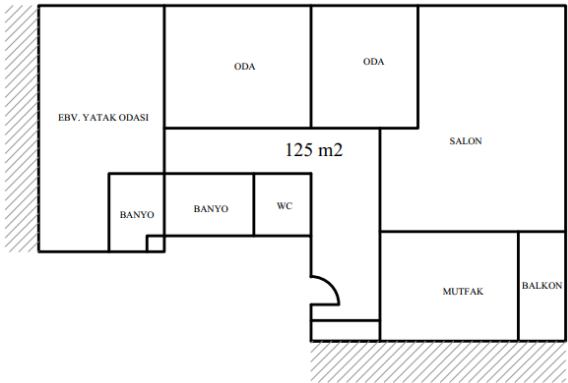



Ankara ilinin farklı ilçelerine ait, İmar ve Şehircilik Dairesi Başkanlığına sunulan Büyükşehir Belediye Meclis kararları içerisinde ortalama konut büyüklüklerinin bilgisi verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak plan bazında brüt 125 m²'lik bir referans konut alanı belirlenmiştir. Brüt cephe yüzey alanı hesaplamak için Ankara'da tek cepheli, 2 cepheli ve çok cepheli daire örnekleri bulunarak benzer planda 125 m²'lik daireler çizilmiştir (Çizelge 3.9). Yükseklik 3 metre kabul edilecek olursa örnek planların ortalama cephe alanı 69.5 m²'dir. Böylece brüt cephe alanının, brüt plan alanının %55.6'sına eşit olduğu bulunur.

Karagözlü'nün (2006) çalışmasına göre pencere alanının toplam cephe alanına oranının optimum %30, minimum %20 olması gerektiği, Koyun ve Koç'un (2017) çalışmasına göre de aynı oranın en uygun %30 olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Çalışmada tüm yapılaşma alanı dikkate alındığı için bu oran optimum olarak %30 kabul edilmiştir.

Referans konuta göre dolu cephe alanı 48,6 m²'dir. Bu oran korunarak 2021 yılı yapı ruhsatı verilen toplam yüzölçümü alanına göre dolu cephe alanları yaklaşık olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.10). Bulunan alan 3 milyon 567 bin m² civarındadır.

- cephe brüt alan / brüt plan = 0.56
- cephe dolu alan / cephe brüt alan = 0.70

Çizelge 3.9. Farklı cephe alanlarına sahip örnek daireler

| Örnek plan (125 m ²)-cephe alanı | Kaynak |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Cephe Brüt Alan: 89,4 m²</p> | <p>Marina Ankara / Çankaya</p>  <p>(Zingat, 2022)</p> |
|  <p>Cephe Brüt Alan: 74,1 m²</p> | <p>Merkez Ankara/Yenimahalle</p>  <p>(Merkezankara, 2022)</p> |
|  <p>Cephe Brüt Alan:45 m²</p> | <p>Merkez Ankara/Yenimahalle</p>  <p>(Merkezankara, 2022)</p> |

Çizelge 3.10. Ankara ili 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alanların toplam ve cephe dolu alanları

| Yapım Yılı | Toplam inşaat alanı (m ²) | Cephe Brüt Alan (m ²) | Cephe Dolu Alan (m ²) |
|------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 2021 | 9,164,850 | 5,095,657 | 3,566,960 |

3.3.1.1. Beton prefabrikasyon oranına bağlı prekast alan bulunması

Türkiye’de prefabrikasyon uygulamaları ilk olarak 1965 yılı itibari ile başlamış olup 2018 İMSAD Yapı Sektörü Raporu’na göre tüm prefabrike sistemlerin toplam inşaat uygulamaları içerisindeki payı %8 civarındadır. Beton prefabrikasyonun payı ise %5-6 civarındadır (Acar, 2006). AB’de % 25’e çıkan prefabrikleşme durumu, ülkemizde yıllar içinde hızlı gelişim gösterememiştir ve daha çok geleneksel inşaat uygulamaları tercih edilmiştir. Kuzey Avrupa ülkelerinde bu oran %40-50 civarına yükselmektedir. Danimarka %45 ve Hollanda %40 prefabrikleşme oranı ile sektördeki en gelişmiş ülkeler olduğu söylenebilir. Avrupa ülkelerinde kişi başına düşen prefabrike üretim 0.38 m³ iken ülkemizde 0.02 m³’tür (Özdamar Sritablaiev ve Umaroğulları, 2020).

Çizelge 3.11. Ankara ili 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alan içerisindeki prekast uygulama alanı

| Yüzölçüm (plan) (m ²) | Cephe Brüt Alan (m ²) | Cephe Dolu Alan (m ²) | Prefabrikasyon Alan (m ²) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 125 (referans konut) | 69.5 | 48.6 | - |
| 9,164,850 | 5,095,657 | 3,566,960 | 3,566,960 x 0.06 = 214,018 (Prekast Uygulama Alanı) |

Fotokatalitik beton esaslı prekast eleman kullanımı için önce 2021 yılı yapı ruhsatı verilen alan içerisindeki cephe alanı bulunmuş ardından %6’sı hesaplanarak prekast elemanların alanı bulunmuştur (Çizelge 3.11). Sonuç üzerinden fotokatalitik etki oranı hesaplanacaktır.

3.3.2. Fotokatalitik betonun NO_x temizleme miktarının bulunması

Literatürde fotokatalitik betonun kirlilik azaltma miktarını gösteren değer aralıkları hem laboratuvar hem de saha uygulamalarında farklılıklar göstermektedir. Bunun temel sebebi sürecin sıcaklık, rüzgar, nem, ışınım gibi çevresel koşullardan önemli oranda etkilenmesidir.

3.3.2.1. Birim alanda uzaklaştırılan NO_x miktarının belirlenmesi

Farklı çalışmalar sonucu fotokatalitik betonun birim alanda ve birim zamanda NO_x temizleme miktarları Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Birim alanda fotokatalitik NO_x bozunma miktarları

| | Ürün Özelliği | NO _x bozunma (mg/m ² /h) | Bağlı Nem | Kaynak |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | Fotokatalitik beton blok (Kaldırım taşı-%2 TiO₂) | 2.5 | %50 | (Poon ve Cheung, 2007) |
| 2 | Fotokatalitik beton blok (Kaldırım taşı- % 10 TiO ₂) | 4 | %50 | (Poon ve Cheung, 2007) |
| 3 | Beyaz çimentolu fotokatalitik harç (Metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanılan çimentolar) | 5.86 | %50 | (Guo ve Poon, 2013) |
| 4 | Beyaz çimentolu fotokatalitik harç (agrega olarak kuvars kumu) | 2.3 | %50 | (Guo ve Poon, 2013) |
| 5 | Beyaz çimentolu fotokatalitik harç (agrega olarak geri dönüştürülmüş kırık cam parçacıkları) | 4.90 | %50 | (Guo ve Poon, 2013) |
| 6 | TX Active Çimento | 1.6 - 2 (Yıllık 6 ila 7.5 g) | - | (İtalcementi Group, 2020) |
| 7 | Fotokatalitik harç (PCP-prekast beton kaldırım) | 18- 35.2 15 - 31.3 13 - 23.5 | %30 %50 %70 | (de Melo ve Trichês, 2012) |
| 8 | Fotokatalitik beton (Ontorino bölgesi hava koşullarına göre) | 6– 20 | - | (Dolatabadi, 2013) |

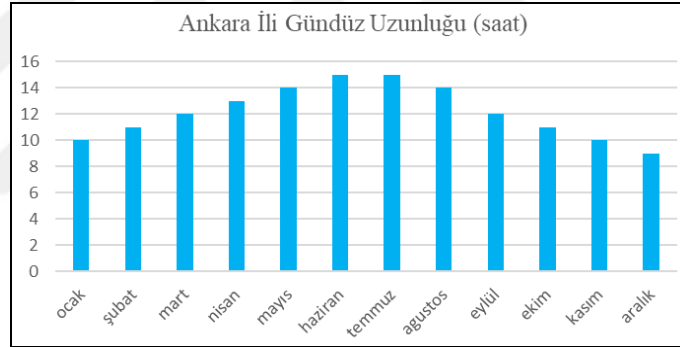
Gösterilen kaynaklara göre; prekast panel üretiminde beton içerisinde sıklıkla kuvars kumu (silis kumu) tercih edildiği için 5 numaralı çalışma, literatürdeki deneysel çalışmalarda yaygın olarak çimento içerisine karıştırılan TiO₂ miktarı optimum %2-3 oranında tutulduğu için 1 numaralı çalışma ve fotokatalitik çimentonun öncüsü İtalcementi firmasının yaptığı tüm test ve ölçümlere dayalı olarak verdikleri yaklaşık değer (6 numaralı çalışma) dikkate alınacak olursa, ortalama verimlilik 2.26 mg/m²/h belirlenir. Fakat Ankara ilinin ortalama bağıl neminin %60 olduğu bilinmektedir (Çiçek ve Doğan, 2005). Buna göre ters orantılı olarak verimin biraz daha düşebileceği varsayılarak bu çalışma için NO_x bozunma miktarı ortalama 2 mg/m²/h kabul edilmiştir.

Çalışma 7 ve 8’de verilen yüksek verimlilikler çalışılan alanın olumlu ortam koşullarına bağlı olabilir.

Fotokatalitik malzeme alanında yapılan çalışmaların eksikliklerinden birisi de, çevresel koşullara göre değişkenlik gösteren fotokatalitik etkinliğin, laboratuvar deneyleri dışında dış ortamda uygulama yapılmadan önce tam olarak hesaplanamıyor oluşudur.

3.3.2.2. Birim alanda uzaklaştırılan yıllık NO_x miktarının belirlenmesi

Ankara ili yıllık toplam gündüz süresi 4,440 saat hesaplanmıştır. Güneşlenme dikkate alınmamıştır. Fotokatalizin gerçekleşmesi için malzemenin UV ışınına maruz kalması yeterlidir. İç ortamlarda düşük UV ışınlarında dahi etkinliği kanıtlanmıştır. Güneş görmeyen kuzey cephelerin bu şekilde uzun yıllar temiz kaldığı görülmüştür (NPCA, 2022).



Şekil 3.11. Ankara ili aylık gündüz uzunluğu ortalamaları

Ankara’ya ait aylık gündüz uzunluğu ortalamaları Şekil 3.11’de verilmiştir. Ankara ili yıllık toplam gündüz süresi ve malzemenin saatlik NO_x uzaklaştırma miktarı üzerinden yıllık NO_x uzaklaştırma miktarı (g/m²/y) elde edilmiştir (Çizelge 3.13).

Çizelge 3.13. Ankara ili yıllık NO_x uzaklaştırma miktarı (g/m²/y)

| Zaman | NO _x uzaklaştırma miktarı |
|--------------|------------------------------------------------------|
| Saatlik | 0.002 g/m ² |
| Günlük (ort) | 0.024 g/m ² |
| Yıllık (ort) | 4,440 (saat) x 0.002 g = 8.88 g/m² |

3.3.3. Yıllık NO_x emisyon azaltımına ilişkin sonuçlar

Birim alanda (m²) yıllık NO_x uzaklaştırma verileri üzerinden Ankara ili 2021 yılı prekast uygulama alanlarında, yıllık temizlenen NO_x miktarı ve atmosfere salınan emisiyona oranı Çizelge 3.14’ te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Fotokatalitik etkinin, Ankara ili 2021 yılı yapılaşma alanına düşen emisyonun giderilmesi üzerindeki payı

| Ankara ili 2021 yılı yapılaşma alanına düşen NO _x emisyon salınımı | Yıllık Fotokatalitik NO _x Giderimi |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sanayi Kaynaklı = 42,969,028 g Evsel Isınma Kaynaklı = 255,149,424 g Trafik Kaynaklı = 368,068,033 g Toplam = 666,186,485 g (Çizelge 3.8) | Mevcut Prekast Uygulama Alanı (2021) x 8.88 g/m ² /y 214,018 m ² x 8.88 = 1,900,480 g/y |
| (1,900,480 / 666,186,485) x 100 → %0.28 azalma | |

Yıllık fotokatalitik NO_x temizlenme miktarının, yıllık yapılaşma alanına düşen emisiyona oranı %0.28 bulunmuştur. Bu oran 2021 yılı içerisinde inşa edilen prefabrik cephe elemanlarında fotokatalitik malzeme kullanılması halinde bulunan orandır. 2020-2024 Temiz Hava Eylem Planı’nda verilen il geneli tüm yapılaşmaya ve insan kaynaklı faaliyetlerin sebep olduğu toplam NO_x emisyonuna göre yaklaşık bir oran belirlemek de mümkündür. Önce THEP içerisinde değerlendirilen 1,760,836 adet konutun plan bazında alanı 220,104,500 m² olarak bulunur. Doğru orantı kullanıldığında bu alana düşen NO_x temizlenme miktarı ise 45,642,230 g’dır (Çizelge 3.15). Bu da il genelindeki toplam ısınma ve trafik kaynaklı NO_x emisyonlarının temizlenme oranını %0.30 verir (Çizelge 3.16). THEP içerisinde değerlendirilen sanayi alanlarıyla ilgili kesin veri olmadığı için toplam emisyon içerisinde %6.4 paya sahip sanayi kaynaklı NO_x emisyonu burada dahil edilmemiştir.

Çizelge 3.15. Farklı yapılaşma alanlarına düşen fotokatalitik bozunma miktarı

| Alan (plan) | Yıllık Fotokatalitik NO _x Giderimi |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 9,164,850 m ² (2021 yılı yapılaşma alanı) | 1,900,480 g (1.9 ton) |
| 220,104,500 m ² (1,760,836 konut x 125 m ²) | 45,642,230 g (45.6 ton) |

Çizelge 3.16. Fotokatalitik etkinin, tüm yapılaşma alanına düşen NO_x emisyonunun temizlenmesi üzerindeki payı

| Tüm yapılaşma alanına düşen yıllık NO _x emisyonu salınımı | Fotokatalitik etki oranı |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 14,968 ton (evsel ısıtma + trafik kaynaklı emisyon) (Çizelge 3.7) = 14,968,000,000 g | %0.30 |

3.3.4. Birim alandaki fotokatalitik etkinliğin hesaplanması

Birim alandaki NO_x temizlenme miktarı, birim alana düşen atık emisyon ve temizlenen emisyonun oranı Çizelge 3.14 dikkate alınarak; Denklem 3.1, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 'deki gibi hesaplanmıştır ve Çizelge 3.17'de gösterilmiştir.

$$\text{Fotokatalitik etki oranı} = \frac{\text{1 m}^2 \text{ alana düşen NO}_x \text{ temizlenme miktarı (prekast oranına göre)}}{\text{1 m}^2 \text{ alana düşen NO}_x \text{ emisyon salınımı}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Fotokatalitik etki oranı} = \frac{1,900,480 \text{ g/y (prefabrikasyon sonucu fotokatalitik temizlenen NO}_x \text{ miktarı) / 9,164,850 m}^2 \text{ (2021 yılı yapılaşma alanı)}}{666,186,485 \text{ g/y NO}_x \text{ (2021 yılı yapılaşma alanına düşen NO}_x \text{ emisyon salınımı) / 9,164,850 m}^2 \text{ (2021 yılı yapılaşma alanı)}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Fotokatalitik etki oranı} = \frac{0.207 \text{ g/m}^2/\text{y}}{72.68 \text{ g/m}^2/\text{y}} \times 100 = \% 0.28 \quad (3.3)$$

Çizelge 3.17. Birim alandaki fotokatalitik NO_x temizlenmesi

| 1 m ² alana düşen NO _x emisyon salınımı (g/y) | 1 m ² alana düşen NO _x bozunma miktarı (g/y) (prefabrikasyon oranına bağlı olarak) | Fotokatalitik etki oranı |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 72.68 | 0.207 | %0.28 |

3.4. Fotokatalitik Etki Oranı Tahmin Yöntemi

- Bir yıllık yapılaşma alanı: **A m²**
 - Değişkendir.
- Bir yıllık yapılaşma alanına düşen NO_x emisyon salınımı: **X g/y**
 - Değişkendir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınladığı farklı illere ait Temiz Hava Eylem Planları içerisinde emisyon envanteri

verileri alınabilir. Alınan veri üzerinden bu çalışmaya benzer şekilde yıllık yapılaşma alanına düşen emisyon miktarı bulunmalıdır. Aksi takdirde veride kullanılan il genelindeki tüm alanların fotokatalitik etki için değerlendirilmesi gerekir.

- Prefabrikasyon oranı: **pr**
 - Değişkendir. Prefabrik beton prefabrikasyonun inşaat sektörü içerisindeki payı ilerleyen yıllarda ya da farklı bölgelere göre değişkenlik gösterebilir.
 - Fotokatalitik etkinin cam, boya, seramik gibi farklı malzemeler üzerinden değerlendirilmesi gereken durumlarda, malzemenin kullanıldığı alanların tüm yapılaşma içerisindeki payı dikkate alınmalıdır.
- Yıllık m² başına düşen fotokatalitik bozunma: **8.88 g/m²/y**
 - Değişken değildir. Gündüz uzunluğu süreleri her ilde farklılık gösterse de yıllık toplam süre her yerde aynıdır. Ankara il çalışmasında güneşin doğma ve batma saatleri dikkate alınarak ortalama yıllık toplam gündüz süresi bulunmuştur. Saatlik NO_x bozunma miktarı ise Çizelge 3.12'de gösterilen kaynaklar dikkate alınarak ortalama değer belirlenmiştir.
- cephe brüt alan (m²) / brüt plan (m²): **0.56**
 - Değişken değildir. Bu çalışmada ortalama konut alanı üzerinden cephe alanı hesaplanmıştır ve değişken olarak kabul edilmemiştir.
- cephe dolu alan (m²) / cephe brüt alan (m²): **0.70**
 - Bu çalışma için değişken değildir. En uygun dolu-boş cephe alanı kaynaklara dayandırılarak belirlenmiştir. Fakat prekast yerine farklı bir malzeme kullanımı durumunda uygulama alanının cepheye oranı değişebilir.
- Referans konut: 125 m² (plan)
- Referans konut brüt cephe alanı: 69.5 m²
- Referans konut dolu cephe alanı: 48.6 m²

Verilen bilgiler dikkate alınarak aşağıdaki formül oluşturulmuştur (Denklem 3.4).

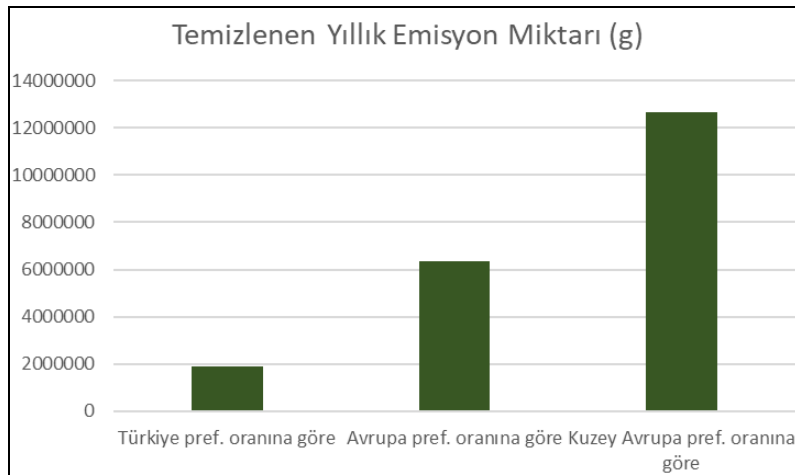
$$\text{Fotokatalitik etki oranı} = \frac{\text{Fotokatalitik Bozunma}_{g/y}}{\text{Toplam Emisyon}_{g/y}} \times 100 = \frac{(A \times 0.56 \times 0.70 \times pr) \times 8.88}{X} \times 100 \quad (3.4)$$

3.5. Prefabrikasyonda Avrupa Standartlarına Göre Fotokatalitik Malzeme Kullanımı

Avrupa’da prefabrike sistemlerin inşaat sektörü içerisindeki payı yaklaşık %20-25’tir. Danimarka gibi Kuzey Avrupa ülkelerinde bu oran %40-50’ye yükselmektedir (Özdamar Sritablaiev ve Umaroğulları, 2020). Türkiye prefabrikasyon sektöründe daha geride kalmış olsa da bir başka senaryo olarak Avrupa standartlarına erişilmesi halinde fotokatalitik etki oranının yeniden hesaplaması yapılmıştır. Çizelge 3.18’de çıkan sonuca göre NO_x bozunması ile atmosferik kirlilik daha yüksek oranlarda azaltılabilmektedir. Şekil 3.12’de karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 3.18. Avrupa standartlarına erişilmesi halinde atmosferik kirliliğin fotokatalitik etkiyle azaltılması

| Koşullar | Prefabrikasyon Oranı | Prekast Uygulama Alanı | Temizlenen NO _x Emisyonu (Yıllık) | Temizlenen NO _x Emisyon Oranı (Yıllık) |
|--------------|----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Türkiye | %6 | $3,566,960 \times 0.06 = 214,018$ m ² | 1,900,480 g | %0.28 |
| Avrupa | %20-25 | $3,566,960 \times 0.20 = 713,392$ m ² | 6,334,921 g | %0.95 |
| Kuzey Avrupa | %40-50 | $3,566,960 \times 0.40 = 1,426,784$ m ² | 12,669,842 g | %1.90 |



Şekil 3.12. Avrupa standartlarına erişilmesi halinde temizlenen yıllık emisyon miktarı

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada Ankara ili model seçilmiş ve mevcut problem çevreci bir yaklaşımla ele alınarak fotokatalitik çimentoların prekast cephe elemanlarında kullanımı sonucu olası etkileri incelenmiştir. Ankara il genelinde azot oksitlerin (NO_x) emisyon miktarı; sanayi kaynaklı 1,032 ton, ısınma kaynaklı 6,128 ton, trafik kaynaklı 8,840 ton olmak üzere toplam 16,000 ton civarındadır. Trafik kaynaklı egzoz emisyonları, toplam emisyon içerisinde %55.2'lik oranla en yüksek paya sahiptir. Özellikle NO_2 limitinin %22 oranında aşıldığı bilinmektedir. Sadece 2021 yılı yapılaşma alanına ait atık NO_x emisyon miktarı 666,186,485 g (666 ton), metrekare başına düşen atık NO_x emisyon miktarı ise 72.68 g bulunmuştur.

Geliştirilen senaryoda Ankara ilinin yıl içindeki toplam gündüz süreleri dikkate alınarak birim alanda yıllık NO_x uzaklaştırılma miktarı gram cinsinden hesaplanmış ve ortalama 8.8 ($\text{g}/\text{m}^2/\text{y}$) bulunmuştur. Türkiye'deki beton prefabrikasyon oranı dikkate alınarak Ankara ili üzerine uyarlanmış, 2021 yılı yapılaşma alanı içerisindeki mevcut prekast uygulama alanları hesaplanmıştır. Bu alanlarda fotokatalitik çimento kullanımı ile yılda yaklaşık 1,900,480 gram NO_x temizlenmektedir ve toplam emisyonu oranı %0.28'dir. Metrekareye düşen NO_x temizlenme oranı ise prefabrikasyon oranı da dikkate alındığında 0.20 $\text{g}/\text{m}^2/\text{y}$ bulunmaktadır. Fotokatalitik etki oranı il genelinde toplam yapı alanı ve toplam atık NO_x emisyon miktarı için düşünülecek olursa fotokatalitik temizlenmenin yaklaşık %0.30 olduğu ortaya koyulmuştur. Yapılan analizler değişkenlere bağlı olarak formülize edilmiştir.

Türkiye'deki beton prefabrikasyon üretiminin inşaat sektörü içindeki payı, sonucu doğrudan etkilemektedir. Prefabrikasyonun ilerleyen yıllarda pazar payının artması ve Avrupa standartlarına yükselmesi durumunda; Avrupa ülkelerinin prefabrikasyon durumuna göre %0.95, Kuzey Avrupa ülkelerinin prefabrikasyon durumuna göre %1.90 oranında atmosferik NO_x temizliği elde edilmektedir.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde il genelinde atık emisyon miktarı belirlemek için belli bölgeler (cadde, sokak kanyonu vb.) referans alınarak fotokatalitik etki oranı bulunmuştur (Sakthivel, 2019). Saha testlerinde ise kısıtlı bir alan içerisinde tüm yüzeye uygulama yapılarak öncesi ve sonrası anlık kirlilik ölçümleri arasındaki oran belirlenmekte ve fotokatalitik etkinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bir başka çalışmada ise il genelinde kirlilik değerlendirilmiş olup birim zamanda temizlenen NO_x

miktarı bölge şartlarına göre daha yüksek hesaplanmıştır bu da sonucu olumlu etkilemiştir (Dolatabadi, 2013). Bu çalışmada birim zamanda NO_x bozunma miktarı önerilen alt sınırdaki tutulup yanılma payı azaltılmış ve dar ölçekte bir alan referans alınarak değil il genelinde yıl içindeki kirletici vasfı olan tüm NO_x kaynakları (sanayi, evsel, trafik) dikkate alındığı için atık emisyon miktarı benzer çalışmalara kıyasla oldukça fazladır. Bir diğer etken olan prefabrikasyon oranının, Türkiye’de düşük olması sebebiyle elde edilen sonuca göre, Türkiye şartlarında fotokatalitik etkinin daha yüksek oranda sağlanabilmesi için alternatif TiO₂ kaplamalar, boyalar, sıvalar, seramik cephe elemanları gibi farklı fotokatalitik yapı malzemelerinin kullanımının gerekli olduğu görülmüştür. Çalışmanın asıl amaçlarından biri olarak ortaya koyulan fotokatalitik etki tahmin yöntemi ile farklı malzemelerin atık emisyon içerisindeki kirletici temizleme payı bulunabilmektedir.

İlerleyen yıllarda prefabrikasyon uygulamalarında beton içeriğinin fotokatalitik hale getirilmesi, başta egzoz dumanı olmak üzere çeşitli atmosferik kirleticilerin etkisini azaltmaya yardımcı olacaktır. Aynı zamanda ülkemizde prefabrike sistemlerin inşaat sektörü içerisindeki payının artırılması; hızlı üretim, daha etkin kalite kontrolü gibi imkanların yanı sıra fotokatalitik çimento kullanımının teşviki ile atmosferdeki azot oksitler başta olmak üzere, kirleticilerin temizlenme oranını artıracaktır.

Büyük şehirler başta olmak üzere ulusal NO₂ limitinin aşıldığı yoğun bölgelerde, fotokatalitik oksidasyon (PCO) teknolojisi sayesinde limit değerlerin altına inmek mümkündür. Emisyonun azaltılmasında çimentolu malzemeler dışında, önceliğin maliyet olduğu durumlarda daha ekonomik çözüm sunabilecek TiO₂ şeffaf film kaplamalar birçok malzeme üzerinde ve saydam cephelerde kullanılabilir. Alternatif olarak fotokatalitik nano boyalar tercih edilebilir. Böylelikle kent içerisindeki fotoaktif yüzey alanları artırılabilir. Aynı zamanda kentsel alanlarda fotokatalitik beyaz çimento kullanımının yaygınlaştırılması ile yüksek yansıtıcılık özelliği sayesinde kentsel ısı adası etkisinde önemli ölçüde azalma olacak, nefes alan şehir merkezleri oluşacaktır.

Fotokataliz etkisi kendi kendini temizleme işlemiyle birleştiğinde binaların ömrünü uzatma imkanı sağlar. Bakımın zor ve maliyetli olabileceği yüksek binalarda temizlik masraflarından, iş gücünden ve zamandan tasarruf edilir. Fakat malzemenin etkinliği gerçek ortam koşullarında doğrulanmalıdır. Bağlı nemin ve rüzgar hızının yüksek olduğu açık bölgelerde fotokatalitik etkinliğin düştüğü bilinmektedir. Laboratuvar şartları, uygulama yeri (şehir içi, sanayileşmiş alanlar, kırsal alanlar)

özellikle meteorolojik veriler gibi birçok değişken sabit bir fotokataliz ve kendini temizleme verimliliği elde edilmesini engeller. Bu soruna iki tür çözüm önerisi getirilebilir. İlki fotokatalizörlerin veya yapı malzemelerinin geliştirilmesi ile ortam koşullarına olan hassasiyetlerini azaltarak verimi daha sabit bir çizgide tutmaktır. Gerek nano yapılarında gerekse yapı malzemeleriyle entegre kullanımlarında zorlu dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı hale getirilmeleri için disiplinlerarası çalışmalar gereklidir. Diğer bir öneri ise farklı mekanlara ve hava şartlarına göre tüm verilerin girdisinin yapıldığı, fotokatalitik etkinliği tahmin edebilecek ve buna göre kullanıcıların uygulama alanını seçebileceği bir tasarım ve uygulama aracı geliştirilmesi olabilir. Bunun için ise malzemenin kullanımının yaygınlaşması sonucu böyle bir programa olan ihtiyacın ve talebin artması gerekir. Görünür ışıkla aktive edilen katalizörlerin geliştirilmesi, TiO₂ nano partiküllerin yüzey alanının genişletilmesi ve fotokataliz verimliliğinin iyileştirilmesi gelecek araştırmalarda ele alınması gereken konu başlıklarındandır. Böylelikle hem çimentonun hem de diğer yapı malzemeleri üzerindeki fotokatalitik etki artırılabilir.

Fotokatalitik malzemelerin kanıtlanan birçok olumlu etkisinin yanı sıra iç ortamlarda uygulanabilirliği üzerinde, fotokataliz sonucu oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesinde bazı eksiklikler vardır. Düşük ortam ışığına bağlı olarak oluşan yan ürünlerin toksik olabileceği yönünde bazı çalışmalar olmasına rağmen kaynaklar oldukça kısıtlıdır. İç ortamlarda oluşacak yan ürünlerin toksikolojik durumunu belirleyecek çalışmalar genişletilmeli, sağlık açısından risk oluşturacak noktalar varsa bunların detayları belirlenmelidir.

Gelecek teknolojileri takip eden küresel pazarda özellikle inşaat sektöründe fotokatalitik malzemelerin daha çok yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu tür malzemeler ekolojik mimarlık kapsamında yeşil binalarda kullanımı son derece uygun, çevreye duyarlı, zorlu çevre koşullarının iyileştirilmesinde mimariye katkı sağlayan yeşil yapı malzemeleridir. Fotokatalitik malzeme kullanımı atmosferik kirliliğin önlenmesi amaçlı yeşil çatı uygulamaları, kat bahçeleri, doğru ısı yalıtım uygulamaları ve enerji tasarruflu sistemler gibi diğer yenilikçi unsurlarla birleştirildiğinde, çevresel fayda noktasında daha büyük etkiler görüleceği söylenebilir. Mimarlık disiplini ile birlikte peyzaj mimarlığı, şehir planlama, mühendislik ve teknoloji gibi farklı disiplinlerin ortak çalışmaları; küresel ısınma ve iklim krizi sorunlarında eşik seviyelerin altında kalmaya yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Acar, M. Ş., 2006, Türkiye’de beton prefabrikasyonun tarihçesi, *Türkiye Prefabrik Birliği*, İstanbul.
- Alkan, Y., 2020, Mimari yapılarda bitkilendirme esaslı yenilikçi tasarım yaklaşımları : Dikey orman, *Akademik Ziraat Dergisi*, 9(1), 55–62.
- Altın, M., ve Orhon A. V., 2014, Akıllı Yapı Cepheleeri ve Sürdürülebilirlik, 7. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 160-168.
- Ankara.bel, 2021a, Karar, Web adresi:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UHyo5b2kfOgJ:https://www.ankara.bel.tr/files/5316/1397/6597/K21__270.docx+&cd=3&hl=tr&ct=clnk&gl=tr [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2022].
- Ankara.bel, 2021b, Meclis Kararları[online], Web adresi:
https://s.ankara.bel.tr/bulten/Mart_Meclis_Kararlari_e-dergi/files/basic-html/page146.html [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2022].
- Ankara.bel, 2021c, Karar, Web adresi:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:0VDtytqqzqJ:https://www.ankara.bel.tr/files/3316/2643/6356/K21__1342.docx+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2022].
- Ankara.bel, 2021d, Karar, Web adresi:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ZnPpVYj71A4J:https://www.ankara.bel.tr/files/2216/3834/7265/K21__2277.docx+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2022].
- Anusree, A., and Baby, N., 2017, Efficiency of Photocatalytic Pavements – A Critical Review, *International Journal of Engineering and Technical Research*, 6(3), 442–445.
- ArchDaily, 2015, Italy Pavilion – Milan Expo 2015 / Nemesi, Web Adresi:
<https://www.archdaily.com/630901/italy-pavilion-milan-expo-2015-nemesi> [Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2022].
- Archiproducts, 2022, Archiproducts [online], Web adresi:
https://www.archiproducts.com/en/products/tegolaia/photocatalytic-concrete-paving-block-betonella-cm6_175927 [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2022].
- Arcvision, 2014, The St. John XXIII Church of the New Bergamo Hospital, Web Adresi:
<http://www.arcvision.org/bergamos-new-hospital-papa-giovanni-xxiii-church/?lang=en> [Ziyaret Tarihi: 5 Mart 2022].
- Arketipo, 2020, Magnetti Building per il nuovo stabilimento di Elettronica FM [online], Web Adresi: <https://www.arketipomagazine.it/magnetti-building-per-il-nuovo-stabilimento-di-elettronica-fm/> [Ziyaret Tarihi: 16 Mart 2022].

- Arkiv, 2022, İTOB Organize Sanayi Bölgesi Yönetim Binası [online], Web adresi: <https://www.arkiv.com.tr/proje/itob-organize-sanayi-bolgesi-yonetim-binasi/1384> [Ziyaret Tarihi: 22 Mayıs 2022].
- Arslan, H., 2019, Titanyum Yüzeylerinde Nanaotübüler Yapı Geliştirilmesi ve Plazma Yüzey Modifikasyonu, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 254.
- Auvinen, J., and Wirtanen, L., 2008, The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality, *Atmospheric Environment*, 42(18), 4101–4112.
- Ayaydın, Y., 1988, Hazır Beton Cephe Elemanlarının Tasarımı, *Beton Hazır Elemanlar Sempozyumu*, YEM, İstanbul,
- Ballari, M. M., and Brouwers, H. J. H., 2013, Full scale demonstration of air-purifying pavement, *Journal of Hazardous Materials*, 254–255(1), 406–414.
- Ballari, M. M., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H., 2011, Experimental study of the NO and NO₂ degradation by photocatalytically active concrete, *Catalysis Today*, 161(1), 175–180.
- Batiserf, 2022, Cité de la Musique et des Beaux Arts – Chambéry [online], Web Adresi: <https://www.pinterest.fr/pin/384424518173109653/> [Ziyaret Tarihi: 21 Mart 2022].
- Blöß S.P., and Elfenthal, L., 2007, Doped titanium dioxide as photocatalyst for UV and visible light, *Proceedings International RILEM Symposium on Photocatalysis. Environment and Construction Materials*, Florence, Italy, 31–38.
- Boonen, E., and Beeldens, A., 2013, Photocatalytic roads: From lab tests to real scale applications, *European Transport Research Review*, 5(2), 79–89.
- Boonen, E., and Beeldens, A., 2014, Recent photocatalytic applications for air purification in Belgium, *Coatings*, 4(3), 553–573.
- Cansun, O., 1980 Yıkanmış Betondan Giydirmeye Cephe Elemanlarının Tasarım, Üretim ve Montajları için Tavsiyeler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Cardellicchio, L., 2020, Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: case study of the Jubilee Church in Rome, *Building Research and Information*, 48(2), 160–179.
- Cassar, L., Beeldens, A., Pimpinelli, N., Guerrini, G. L., 2007, Photocatalysis of cementitious materials, *International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction*, Italy, 131 – 145.
- Cassar, L., Pepe C., Tognon G., Guerrini G.L. Amadelli R., 2003, White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties, *11th Int. Congr. on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, 4, 1-11.

- Chen, J., and Poon, C., 2009, Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications, *Building and Environment*, 44(9), 1899–1906.
- Cimax Ecosystem, 2022, Photocatalytic Cement Paint, Web Adresi: <https://pt.slideshare.net/yaguilar83/current-projects-3653396> [Ziyaret Tarihi: 22 Mayıs 2022].
- Countonconcrete, 2008, Combat Global Warming, Web Adresi: <http://www.countonconcrete.org/wp-content/uploads/2016/11/QD027P-Combat-Global-Warming.pdf> [Ziyaret Tarihi: 9 Mart 2022].
- Crispino, M., 2010, Innovative Photocatalytic Pavements, *International Sustainable Pavements Workshop*. Airlinie Ceneter, USA.
- Ćurčić, A. A., 2018, Photocatalytic Self Cleaning Facades, 16, 425–436.
- ÇED, 2019, Yılı İl Çevre Durum Raporları[online], Web adresi: <https://ced.csb.gov.tr/2019-yili-il-cevre-durum-raporlar-i-98681> [Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2021].
- Çiçek, İ., ve Doğan, U., 2005, Ankara’da Şehir Isı Adasının İncelenmesi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 3(1), 57–72.
- Çimsa, 2022a, Prefabrik İmalatı ve Beyaz Çimento: Teknik Kılavuz [online], Web adresi: <https://cimsa.com.tr/formulhane/beyaz-cimento/prefabrik-imalati-ve-beyaz-cimento-teknik-kilavuz> [Ziyaret Tarihi: 2 Mart 2022].
- Çimsa, 2022b, Beton Özellikleri: Kendini Temizleyen Beton (Nano TiO₂) Nedir? [online], Web adresi: <https://cimsa.com.tr/formulhane/beyaz-cimento/beton-ozellikleri-kendini-temizleyen-beton-nano-tio-sub-2-sub-nedir> [Ziyaret Tarihi: 2 Mart 2022].
- Dalila, C., and Ingeino, R., 2020, Pannelli in cemento fotocatalitico per una facciata 'mangia smog' nel cuore di Milano [online], Web Adresi: <https://www.ingegno-web.it/26692-pannelli-in-cemento-fotocatalitico-per-una-facciata-mangia-smog-nel-cuore-di-milano> [Ziyaret Tarihi: 8 Mart 2022].
- Delibas, T., and Marasli, M., 2015, Self-cleaning and air purifying cement based GRC panels used in Tüpraş Rub Project, *17th International Congress of the GRCA, Radison Blu*, Dubai, 1–6.
- Demeestere, K., Dewulf, J., De Witte, B., Beeldens, A., Van Langenhove, H., 2008, Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO₂, *Building and Environment*, 43(4), 406–414.
- de Melo, J. V. S., and Trichês, G., 2012, Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO_x), *Building and Environment*, 49(1), 117–123.

- de Melo, J. V. S., Trichês, G., Gleize, P. J. P., Villena, J., 2012, Development and evaluation of the efficiency of photocatalytic pavement blocks in the laboratory and after one year in the field, *Construction and Building Materials*, 37, 310-319.
- Demirci, E. S., 2019, Hava Kirliliği ve Küresel Isınmayı Önlemede Yeşil Çatıların Etkileri Üzerine Kritik Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 77.
- Devahasdin, S., Fan, C., Li, K., Chen, D. H., 2003, TiO₂ photocatalytic oxidation of nitric oxide: transient behavior and reaction kinetics, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 156(1-3), 161-70.
- Dolatabadi, M. H., 2013, Properties and Performance of Photocatalytic Concrete, Master Thesis, *University of Toronto*, Toronto, 134
- Dylla, H., Hassan, M. M., Schmitt, M., Rupnow, T., Mohammad, L. N., 2011, Laboratory Investigation of the Effect of Mixed Nitrogen Dioxide and Nitrogen Oxide Gases on Titanium Dioxide Photocatalytic Efficiency in Concrete Pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 1087-1093.
- Egethm, 2022, Hava Kalitesi İndeksi [online], Web Adresi: <https://egethm.csb.gov.tr/hava-kalitesi-indeksi-i-87403> [Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2022].
- Elbir, T., Müezzinoğlu, A., Bayram, A., 2000, Evaluation of some air pollution indicators in Turkey, *Environment International*, 26(1-2), 5-10.
- Frances, 2013, İtalcementi i.lab / Richard Meier & Partners [online], Web Adresi: <https://www.archdaily.com/322819/italcementi-i-lab-richard-meier-partner> [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022].
- Fujishima, A., and Honda, K., 1972, Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, *Nature*, 238(5358), 37-38.
- Gallus, M., Akylas, V., Barmpas, F., Beeldens, A., Boonen, E., Boréave, A., Cazaunau, M., Chen, H., Daële, V., Doussin, J. F., Dupart, Y., Gaimoz, C., George, C., Gosselin, B., Herrmann, H., Ifang, S., Kurtenbach, R., Maille, M., Mellouki, A., Miet, K., Mothes, F., Moussiopoulos, N., Poulain, L., Rabe, R., Zapf, P., Kleffmann, J., 2015, Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels: NO_x abatement results, *Building and Environment*, 84, 125-133.
- García, L. D., Pastor, J. M., Peña, J., 2018, Self cleaning and depolluting glass reinforced concrete panels: Fabrication, optimization and durability evaluation, *Construction and Building Materials*, 162, 9-19.
- Gopalan, A. I., Lee, J. C., Saianand, G., Lee, K. P., Sonar, P., Dharmarajan, R., Hou, Y. L., Ann, K. Y., Kannan, V., Kim, W. J., 2020, Recent progress in the abatement of hazardous pollutants using photocatalytic TiO₂-based building materials, *Nanomaterials*, 10(9), 1-50.

- Göçer, G., 2005, Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panellerinde Yüzey Özelliklerine Bağlı Atmosferik Kirlenme Etkisi, 2. *Ulusal Çatı&Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu*, İstanbul, 11-19.
- Görgülüer, H., Çakıroğlu, B., Özacar, M., 2021, Ag NPs deposited TiO₂ coating material for superhydrophobic, antimicrobial and self-cleaning surface fabrication on fabric, *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(2), 569–579.
- Greenmillenium, 2022, Outdoor / Exterior Application [online], Web adresi: <http://www.greenmillennium.com/outdoor-exterior/> [Ziyaret Tarihi: 16 Mayıs 2022].
- Grillini, B., 2020, Carvico (Bergamo): Palestra comunale [online], Web Adresi: <https://www.sporteimpianti.it/principale/tsport/palazzetti-e-palestre/carvico-bergamo-palestra-comunale/> [Ziyaret Tarihi: 6 Mart 2022].
- Guerrini, G. L., 2012, Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results, *Construction and Building Materials*, 27(1), 165–175.
- Guo, M., and Poon, C., 2013, Photocatalytic NO removal of concrete surface layers intermixed with, *Building and Environment*, 70, 102–109.
- Hanson, S., 2014, Evaluation of Concrete Containing Photocatalytic Titanium Dioxide, PhD Thesis, *University of Utah Department of Civil and Environmental Engineering*, USA, 105.
- Hashimoto, K., 2007, TiO₂ Photocatalysts Toward Novel Building Materials, *International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials*, Florence, Italy, 3-8
- Hashimoto, K., Irie, H., Fujishima, A., 2005, TiO₂ photocatalysis: A historical overview and future prospects, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 44(12), 8269–8285.
- Hassan, M., Mohammad, L. N., Asadi, S., Dylla, H., CooperIII, S., 2012, Sustainable Photocatalytic Asphalt Pavements for Mitigation of Nitrogen Oxide and Sulfur Dioxide Vehicle Emissions, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(3), 365–371.
- Havaizleme, 2022, Web Adresi: <https://www.havaizleme.gov.tr/> [Ziyaret Tarihi: 27 Şubat 2022].
- HeidelbergCement, 2020, HeidelbergCement Headquarters [online], <https://www.heidelbergcement.com/en/heidelbergcement-headquarters-germany> [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022].
- HeidelbergCement, 2022a, Magnet Residential Center [online], Web Adresi: <https://www.heidelbergcement.com/en/magnet-residential-center> [Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2022].

- HeidelbergCement, 2022b, Le Bon Coin [online], Web Adresi: <https://www.heidelbergcement.com/en/le-bon-coin-france> [Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2022].
- Herrmann, J.M. Péruchon, L., Puzenat, E., Guillard, C., 2007, Photocatalysis: From fundamentals to self-cleaning glass application, *International RILEM symposium on photocatalysis, environment and construction materials*, Bagnaux, France, 41-48
- Hüsken, G., Hunger, M., Brouwers, H. J. H., 2009, Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification, *Building and Environment*, 44(12), 2463–2474.
- IIR, 2021, Türkiye'nin Bilgilendirici Envanter Raporu, Web adresi: <https://cygm.csb.gov.tr/> [Ziyaret Tarihi: 15 Mar 2022].
- İMSAD, 2018, Türkiye İMSAD Yapı Sektörü Raporu, Web adresi: http://tgub.org.tr/SF/830/Turkiye_IMSAD%20_Yapi_Sektoru_Raporu_2018_web.pdf [Ziyaret Tarihi: 22 Mart 2022].
- İtalcementi Group, 2020, Photocatalytic Communication Kit-The role of photocatalytic cement-based products as sustainable solutions, <https://www.italcementi.it/it/txactive-principio-attivo> [Ziyaret Tarihi: 7 Mar 2022].
- İtalcementi Group, 2022a, Tx Active II principio attivo fotocatalitico- Risultati scientifici, Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/txactive-principio-attivo> [Ziyaret Tarihi: 7 Mar 2022].
- İtalcementi Group, 2022b, Tx Active II principio attivo fotocatalitico- La conservazione dei valori estetici, Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/txactive-principio-attivo> [Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2022].
- İtalcementi Group, 2022c, i.lab Italcementi [online], Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/ilab> [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022].
- İtalcementi Group, 2022d, Abitare consapevole [online], Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/residenza-novampere-milano> [Ziyaret Tarihi: 6 Mart 2022].
- İtalcementi Group, 2022e, La palestra di Carvico (BG): un edificio snello ma muscolare [online], Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/palestra-carvico-cemento-bianco> [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022].
- İtalcementi Group, 2022f, Lavorare in un microcosmo: l'Energy Park di Vimercate [online], Web adresi: <https://www.italcementi.it/it/energy-park-vimercate> [Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2022].
- İtalcementi, 2022g, Le Torri Vodafone: il complesso eco tecnologico a Milano [online], Web Adresi: <https://www.italcementi.it/it/torri-vodafone-milano> [Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2022].

- Kale, 2017, Teknik Katalog, Web Adresi: <https://www.kale.com.tr/tr/destek/katalog-brosurler> [Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2021].
- Karagözlü, A. B., 2006, Konutlarda Enerji Giderlerinin Azaltılmasına Yönelik Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 128
- KaraRapor, 2021, Kara Rapor 202: Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri, Web adresi: <http://www.temizhavahakki.com/kararapor2021/> [Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2022].
- Khandve, P. V., 2016, Nanotechnology for Building Material, *International Journal of Basic and Applied Research Special*, 04, 146-151.
- Koçu, N., Dereli, M., 2008, Konya’da Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Çözümünde Binalarda Isı Yalıtımı Kullanımının Önemi, *Ulusal Hava Kalitesi Sempozyumu*, Konya, 645-654.
- Koyun, T., ve Koç, E., 2017, Bir Binanın Değişken Cam ve Dış Duvar Tiplerine Göre Pencere/Duvar Alanı Oranlarının Bina Isı Kayıplarına Etkisi, *Engineer and Machinery*, 58 (688), 1-14
- Kozłowski, P., 2022, Elégance et photocatalyse vont de pair pour le siège social de St-Agne Immobilier à Toulouse [online], Web Adresi: <https://calcia-infos.fr/elegance-et-photocatalyse-vont-de-pair-pour-le-siege-social-de-st-agne-immobilier-a-toulouse/> [Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2022].
- Kula G., Karasu B., 2017, Kendi Kendini Temizleyen Yüzeyler, *Seramik Türkiye Bilim Teknik ve Endüstri Dergisi*, 108-115.
- Kuloğlu Yüksel, F. Ş., ve Karagüler, M., 2011, “Kendi Kendini Temizleyen Betonlar” *Beton 2011 Kongresi Bildirileri*, THBB, 470-480.
- Kuzmichev, A. A., and Loboyko, V. F., 2016, Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning, *Procedia Engineering*, 150, 2095–2101.
- Kuzmichev, A. A., Azarov, V. N., Kuzmichev, A. V., 2020, The Effect of Atmospheric Pollution on Building Materials in the Urban Environment, *Journal of Materials and Applications*, 9(2), 70-78.
- Lignarolo, L. E. M., Lelieveld, C., Teuffel, P., 2011, Shape morphing wind-responsive facade systems realized with smart materials, *Adaptive Architecture Conference*, 1–14.
- Linkous, C. A., Carter, G. J., Locuson, D. B., Ouellette, A. J., Slattery, D. K., Smitha, L, A., 2002, Photocatalytic inhibition of algae growth using TiO₂,WO₃, and cocatalyst modifications, *Environmental Science and Technology*, 34(22), 4754-4758.

- Low, E., 2014, Scientists create clearer glass with permanent, superhydrophilic ceramic coating [online], Web adresi: <https://phys.org/news/2014-06-scientists-clearer-glass-permanent-superhydrophilic.html> [Ziyaret Tarihi: 28 Mayıs 2022].
- Luigi, 2022, İtaly Pavilion Expo 2015 Milan [online], Web Adresi: <http://www.nemesistudio.it/en/projects/type/culture/item/714-italy-pavilion-expo-2015-milan.html> [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022].
- Maggos, T., Bartzis, J. G., Liakou, M., Gobin, C., 2007, Photocatalytic degradation of NO_x gases using TiO₂-containing paint: A real scale study, *Journal of Hazardous Materials*, 146(3), 668–673.
- Mansour, A. M. H., and Al-Dawery, S. K., 2018, Sustainable self-cleaning treatments for architectural facades in developing countries, *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 867–873.
- Maraşlı, M., 2022, Beton Cephe Sistemleri ve Yeni Gelişmeler, Web adresi: <https://docplayer.biz.tr/20386836-Beton-cephe-sistemleri-ve-yeni-gelismeler-muh-muhammed-marasli.html> [Ziyaret Tarihi: 28 Şubat 2022].
- Matsunaga, T., Tomada, R., Nakajima, T. Wake, H., 1985, Photochemical Sterilization of Microbial Cells by Semiconductor Powders, *FEMS Microbiology Letters*, 29 (1-2), 211–214.
- Merkezankara, 2022, Merkez Ankara, Web adresi: <https://www.merkezankara.com.tr/kat-planlari.aspx> [Ziyaret Tarihi: 23 Mayıs 2022].
- Mimdap, 2015, Web adresi: Şişli Belediyesi Binası [online] <http://mimdap.org/2015/03/thithli-belediyesi-binasy/> [Ziyaret Tarihi: 27 Aralık 2021].
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Kurmus, H., Milas, J., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Kadir, A. A., 2019, Nanoparticles in Construction Materials and Other Applications, and Implications of Nanoparticle Use, *Materials*, 12(19), 3052.
- Nakata, K., and Fujishima, A., 2012, TiO₂ photocatalysis: Design and applications, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169–189.
- Nazari, A., and Riahi, S., 2010, The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete, *Materials Science and Engineering A*, 528(2), 756–763.
- Nazari, A., and Riahi, S., 2011, The effects of TiO₂ nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder, *Materials Science and Engineering A*, 528(4–5), 2085–2092.

- Nikolov, N., and Fox, J. T., 2015, Clean by Concrete: Use of Photocatalytic Concrete enables Buildings to be Passive Environmental Remediators, *Research Journal of Engineering Science*. Vol. 4(8), 1-8.
- NPCA, 2022, Whoul you Should Know: Depollution, Photocatalytsis [online], Web Adresi: <https://precast.org/2010/05/words-you-should-know-depollution-photocatalytsis/> [Ziyaret Tarihi: 12 Nisan 2022].
- Özdamar Sritablaiev, M., ve Umaroğulları, F., 2020, Dünyada ve Türkiye’de Betonarme Prefabrikasyon, *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 5(2), 309-320.
- Pavetechinc, 2022, Remediating Pollution with Photocatalytic Pavements [online], Web adresi: <https://www.pavetechinc.com/wpcontent/uploads/2017/11/Historical-Context-for-PTI-Ti-Related-Innovations.pdf> [Ziyaret Tarihi: 27 Mayıs 2022].
- Poon, C. S., and Cheung, E., 2007, NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials, *Construction and Building Materials*, 21(8), 1746–1753.
- Prosolve370e, 2022, Torre de Especialidades Hospital Manuel Gea Gonzales [online], Web Adresi: <http://www.prosolve370e.com/home> [Ziyaret Tarihi: 8 Mart 2022].
- Ramirez, A. M., Demeestere, K., De Belie, N., Mäntylä, T., Levänen, E., 2010, Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes: Preparation, characterization and toluene removal potential, *Building and Environment*, 45(4), 832–838.
- Ramírez, A. Z., and Muñoz, C. B., 2012, Albedo Effect and Energy Efficiency of Cities, Spain, Web adresi: <https://www.intechopen.com/chapters/29929> [Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2022].
- Saarchem, 2022, Titan (TiO₂) [online], Web adresi: <https://www.saarchem.com/titan.php> [Ziyaret Tarihi: 28 Mayıs 2022].
- Sakthivel, Y., 2019, Urban Facades: Photocatalytic Building Envelope for Passive Remediation of Air Pollution, Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 142.
- Salemi, N., Behfarnia, K., Zaree, S. A., 2014, Effect of nanoparticles on frost durability of concrete, *Asian Journal of Civil Engineering*, 15(3), 411–420.
- Salthammer, T., and Fuhrmann, F., 2007, Photocatalytic surface reactions on indoor wall paint, *Environmental Science and Technology*, 41(18), 6573–6578.
- Sarıbel, M., 2017, SnO Nanopartiküllerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotokatalitik Aktivitesinin İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 69.
- Sarıgül, H., and Sorar, İ., 2016, Sol-Jel Yöntemiyle Hazırlanan TiO₂ Filmlerin Optik ve Elektrokromik Özellikleri, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 81–88.

- Sayılkan, F., 2007, Nano-TiO₂ fotokatalizör sentezi ve fotokatalitik aktivitesinin belirlenmesi, 42.
- Schwarz, P. F., Turro, N. J., Bossmann, S. H., Braun, A. M., Abdel Wahab, A. M. A., Dürr, H., 1997, A New Method To Determine the Generation of Hydroxyl Radicals in Illuminated TiO₂ Suspensions, *Journal of Physical Chemistry B*, 101(36), 7127–7134.
- Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L., Ye, J., 2015, Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete, *Journal of Cleaner Production*, 87, 762–765.
- Sopov, V. P., Shyshko, N. S., Kondrashchenko, V. I., Yihe, Z., 2020, Ecological efficiency photocatalytic concrete, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907(1), 012052.
- Spasiano, D., Marotta, R., Malato, S., Fernandez-Ibañez, P., Di Somma, I., 2015, Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach, *Applied Catalysis B: Environmental*, 170–171, 90–123.
- Sümer, G., Ç., 2014, Air pollution control: analyse of legal arrangements and organizations devoted to prevention of air pollution, *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 0(13), 37-56.
- Temizhavahakki, 2021, Dünya Hava Kirliliği raporu açıklandı: Türkiye yine 46. Sırada [online], Web adresi: <https://www.temizhavahakki.com/2021-dunya-hava-kirliligi-raporu-aciklandi-turkiye-yine-46-sirada/> [Ziyaret Tarihi: 24 Mayıs 2022].
- THEP, Ankara İli Temiz Hava Eylem Planı, Web adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ankara/icerikler/temiz-hava-eylem-planı-2020-2024-v.3.0-20200122070703.pdf> [Ziyaret Tarihi: 23 Mart 2022].
- Topçu, İ. B., Akkan, E., Uygunoğlu, T., Çalışkan, K., 2020, Self-Cleaning Concretes: An Overview, *Journal of Cement Based Composites*, 1(2), 6–12.
- Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., Grdić, Z., 2016 White cement concrete as an element of sustainable building, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, 32(29), 405–413.
- Tozam, İ., ve Karaca, Ü.B., 2018, Kentsel Isı Adası Et kisi ve Serin Çatılar, 9. *Ulusal Çatı & Cephe Konferansı*, İstanbul Kültür Üniversitesi, 12-13.
- TÜİK, İstatistik Veri Portalı [online], Web Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/> [Ziyaret Tarihi: 22 Mart 2022].
- Ünverdi, H. T., Canbaz, M., Balk, Y., 2016, Self Cleanable Tile Grout, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 13.

- Wang, L., Zhang, H., Gao, Y., 2018, Effect of TiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of cement at low temperatures, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-12.
- Wang, S., Ang, H. M., Tade, M. O., 2007, Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art, *Environment International*, 33(5), 694–705.
- Xxi, 2015, Özgün Detaylar [online], Web adresi: <https://xxi.com.tr/i/ozgun-detaylar> [Ziyaret Tarihi: 22 Mayıs 2022].
- Yılmaz, Ş., 2020, Türkiyenin Enerji Görünümü Oda raporu, *MMO/717*, Ankara, 5-18.
- Zhang, L., Dillert, R., Bahnemann, D., Vormoor, M., 2012, Photo-induced hydrophilicity and self-cleaning: Models and reality, *Energy and Environmental Science*, 5(6), 7491–7507.
- Zhao, X., Zhao, Q., Yu, J., Liu, B., 2008, Development of multifunctional photoactive self-cleaning glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(12–13), 1424–1430.
- Zingat, 2022, Marina Ankara [online], Web adresi: <https://www.zingat.com/marina-ankara-11607p> [Ziyaret Tarihi: 23 Mayıs 2022].