



**NANOPARTİKÜLLER (TiO₂ ve SiO₂) İLE MODİFİYE EDİLEN
VERNİKLERİN AHŞAP MALZEMEDE BAZI YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa TOSUN

Danışman

Doç. Dr. Abdi ATILGAN

NANOBİLİM VE NANO TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANOPARTİKÜLLER (TiO₂ VE SiO₂) İLE MODİFİYE EDİLEN
VERNİKLERİN AHŞAP MALZEMEDE BAZI YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mustafa TOSUN

Danışman

Doç. Dr. Abdi ATILGAN

NANOBİLİM VE NANO TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Mustafa Tosun tarafından hazırlanan “Nanopartiküller (TiO₂ ve SiO₂) ile Modifiye Edilen Verniklerin Ahşap Malzemede Bazı Yüzey Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 09/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Abdi ATILGAN

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin PEKER
Artvin Çoruh Üniversitesi, Orman Fakültesi İmza

Üye : Doç. Dr. Ersen MERTGENÇ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon MYO İmza

Üye : Doç. Dr. Abdi ATILGAN
Üniversite adı, Fakültesi İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26 / 01 / 2026

Mustafa TOSUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANOPARTİKÜLLER (TiO₂ VE SiO₂) İLE MODİFİYE EDİLEN VERNİKLERİN AHŞAP MALZEMEDE BAZI YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa TOSUN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nano Teknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdi ATILGAN

Bu tez çalışmasında, nano partiküller (TiO₂ ve SiO₂) ile modifiye edilen verniklerin ahşap malzemelerde bazı yüzey özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada farklı özgül ağırlıkları temsilen iki ağaç türü tercih edilmiştir: yerli, düşük yoğunluklu *Pinus brutia* (kızılçam) ve ithal, yüksek yoğunluklu *Chlorophora excelsa* (iroko). Deney örnekleri TS 3129 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Nano katkı maddesi olarak titanyum oksit (TiO₂) ve silika (SiO₂), %1 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Kaplama malzemesi olarak ise çift komponentli sertleştiricili epoksi reçine ile akrilik esaslı çift komponentli sertleştiricili vernik tercih edilmiştir. Bu kapsamda; 2 ağaç türü × 2 vernik türü × 2 nano partikül türü × 2 katkı oranı olmak üzere toplamda 8 farklı kombinasyon elde edilmiştir. Deney örnekleri ASTM D 3023 esaslarına göre verniklenmiştir. Deney örneklerinden, renk değeri ASTM D 2244, parlaklık değeri ASTM D 523, yüzey pürüzlülüğü TS 2495 EN ISO 3274 ve TS 6212 EN ISO 4288 standartları esas alınarak belirlenmiştir

Vernik uygulamaları fırça yöntemi ile gerçekleştirilmiş, ardından standartlara uygun testlerle yüzey özellikleri değerlendirilmiştir. Renk ölçümlerinde CIE L*, a*, b*, C* ve h° değerleri; parlaklık ölçümlerinde 60° açıda liflere paralel ve dik yönlerde, parlaklık değerleri; pürüzlülük ölçümlerinde ise Ra, Rz ve Rq parametreleri incelenmiştir. Elde edilen veriler SPSS paket programı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) ve Duncan çoklu karşılaştırma testine tabi tutulmuştur.

Üstyüzey işlem maddelerinin renk değişiminde L^* değeri en fazla iroko odunu akrilik vernik+%2 TiO₂ uygulamasında 138,34 artış, en az iroko odunu epoksi reçine+%2 SiO₂ uygulamasında 0.65 azalış göstermiştir. a^* değeri en fazla kızılçam odunu epoksi reçine+%2 SiO₂ uygulamasında 58,77 artış, en az iroko odunu akrilik vernik+%2 TiO₂ uygulamasında 103,41 azalış göstermiştir. b^* değeri en fazla kızılçam odunu epoksi reçine+%2 SiO₂ uygulamasında 16,85 artış, en az iroko odunu akrilik vernik+%2 TiO₂ uygulamasında 124,12 azalış göstermiştir. Liflere dik parlaklık değişiminde en fazla kızılçam odunu epoksi reçine+%1 SiO₂ uygulamasında 5,11 gloss artış, en az iroko odunu akrilik vernik+%2 TiO₂ uygulamasında 18,29 gloss azalış gerçekleşirken, liflere paralel parlaklık değişiminde ise en fazla kızılçam odunu epoksi reçine+%1 SiO₂ uygulamasında 6,85 gloss artış görülürken, en az iroko odunu akrilik vernik+%2 SiO₂ uygulamasında 4,38 gloss azalış görülmüştür. R_a pürüzlülük değerleri en fazla kızılçam odunu akrilik vernik+%1 SiO₂ uygulamasında 190,17 μm artış, en az ise kızılçam odunu epoksi reçine kontrol grubunda çıkmıştır. R_q pürüzlülük değerleri en fazla kızılçam odunu akrilik vernik+%1 SiO₂ uygulamasında 161,09 μm artış, en az kızılçam odunu epoksi reçine kontrol grubunda çıkmıştır. R_z pürüzlülük değerleri en fazla iroko odunu akrilik vernik kontrol grubu uygulamasında tespit edilirken, en az ise iroko odunu epoksi reçine+%2 SiO₂ uygulamasında 42,40 μm tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda nano partikül katkılarının ahşap yüzeylerin estetik ve fiziksel özellikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmüştür. Özellikle nano TiO₂ ve SiO₂ katkılarının, ahşap yüzeylerin parlaklık ve pürüzlülük değerlerini iyileştirdiği; renk değerlerinde ise ağaç türü, vernik türü ve katkı oranına bağlı farklılıkların meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, endüstride kullanılan üst düzey yüzey işlem malzemelerine nano katkılar eklenerek daha dayanıklı ve estetik açıdan geliştirilmiş ahşap kaplama yüzeyleri elde edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Nano partiküller, Titanyum oksit, Silika, Ahşap yüzey özellikleri, Kızılçam, İriko

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF SOME SURFACE PROPERTIES OF VARNISHES MODIFIED WITH NANOPARTICLES (TiO₂ AND SiO₂) ON WOOD

Mustafa TOSUN

Afyon Kocatepe University

Institute of Science

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdi ATILGAN

This thesis investigates the effects of varnishes modified with nanoparticles (TiO₂ and SiO₂) on some surface properties of wood. Two wood species representing different specific gravities were selected for the study: local, low-density *Pinus brutia* (red pine) and imported, high-density *Chlorophora excelsa* (iroko). Test samples were prepared in accordance with the TS 3129 standard. Titanium oxide (TiO₂) and silica (SiO₂) were used as nanoadditives at 1% and 2% ratios. Two-component epoxy resin with hardener and acrylic-based two-component hardener varnish were chosen as coating materials. A total of eight different combinations were obtained: 2 wood species × 2 varnish types × 2 nanoparticle types × 2 additive ratios. Test samples were varnished according to ASTM D 3023. Color values were determined based on ASTM D 2244, gloss values were determined based on ASTM D 523, and surface roughness was determined based on TS 2495 EN ISO 3274 and TS 6212 EN ISO 4288 standards.

Varnish applications were performed using a brush method, and surface properties were then evaluated using standardized tests. Color measurements included CIE L*, a*, b*, C*, and h° values. For gloss measurements, gloss values were measured at 60° angles in directions parallel and perpendicular to the fibers; for roughness measurements, Ra, Rz, and Rq parameters were examined. The obtained data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple comparison test using the SPSS software package.

In the color change of the surface treatment materials, the L^* value showed the highest increase of 138.34 in the iroko wood acrylic varnish + 2% TiO_2 application and the lowest decrease of 0.65 in the iroko wood epoxy resin + 2% SiO_2 application. The a^* value showed the highest increase of 58.77 in the red pine wood epoxy resin + 2% SiO_2 application and the lowest decrease of 103.41 in the iroko wood acrylic varnish + 2% TiO_2 application. b^* value increased by 16.85 μm the most in red pine wood epoxy resin + 2% SiO_2 application, and decreased by 124.12 μm the least in red pine wood acrylic varnish + 2% TiO_2 application. In the gloss change perpendicular to the fibers, the most gloss increase was 5.11 gloss in red pine wood epoxy resin + 1% SiO_2 application, and decreased by 18.29 gloss in red pine wood acrylic varnish + 2% TiO_2 application, while in the gloss change parallel to the fibers, the most gloss increase was 6.85 gloss in red pine wood epoxy resin + 1% SiO_2 application, and decreased by 4.38 gloss in red pine wood acrylic varnish + 2% SiO_2 application. R_a roughness values increased by 190.17 μm the most in red pine wood acrylic varnish + 1% SiO_2 application, and decreased by 190.17 μm the least in red pine wood epoxy resin control group. R_q roughness values increased by 161.09 μm in the red pine wood acrylic varnish + 1% SiO_2 application, and the lowest in the red pine wood epoxy resin control group. R_z roughness values were highest in the red pine wood acrylic varnish control group application, while the lowest were 42.40 μm in the red pine wood epoxy resin + 2% SiO_2 application.

The study revealed that nanoparticle additives have significant effects on the aesthetic and physical properties of wood surfaces. In particular, nano TiO_2 and SiO_2 additives improved the gloss and roughness of wood surfaces, while color values varied depending on the wood species, varnish type, and additive ratio. These results demonstrate that adding nanoadditives to high-end surface treatment materials used in the industry can yield more durable and aesthetically enhanced wood veneer surfaces.

Keywords: Nanoparticles, Titanium oxide, Silica, Wood surface properties, Red pine, Iriko

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Abdi ATILGAN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Atilla EVCİN, Prof. Dr. Musa ATAR, Prof. Dr. Hüseyin PEKER, Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ ve Tek. Ali TEMEL'e her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mustafa TOSUN
Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nanobilim ve Nanoteknolojiye Genel Bakış.....	3
1.2. Ağaç Malzeme ve Nanoteknoloji İlişkisi	4
1.3. Kullanılan Ağaç Malzemenin Temel Yapısı ve Fiziksel Özellikleri	6
1.3.1. Kızılçam (<i>Pinus brutia</i>).....	6
1.3.2. İroko (<i>Chlorophora excelsa</i>).....	8
1.4. Kullanılan İnorganik Katkılar (TiO ₂ , SiO ₂) ve Çift Komponentli Polimer Sistemlerin (Epoksi, Akrilik) Temel Yapısı ve Fiziksel Özellikleri.....	9
1.4.1 . Titanyum Dioksit (TiO ₂).....	10
1.4.2. Silika (SiO ₂)	11
1.4.2. Epoksi Reçine.....	11
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	13
3. MATERYAL ve METOT	21
3.1. Materyal	21
3.1.1. Ağaç Malzeme.....	21
3.1.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler	21

3.2.	Metot	22
3.2.1.	Deney Örneklerinin Hazırlanması.....	22
3.2.2.	Vernik Karışımlarının Hazırlanması	23
3.2.3.	Vernik Uygulaması	25
3.2.4.	Ölçümler.....	25
3.2.4.1.	Renk Ölçümü.....	26
3.2.4.2.	Parlaklık Ölçümü.....	27
3.2.4.3.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	29
3.3.	Veri Değerlendirme	30
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA.....	31
4.1.	Renk Ölçümü.....	31
4.2.	Parlaklık Ölçümü.....	51
4.3.	Yüzey Pürüzlülüğü Analizi (R_a , R_q , R_z)	60
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	71
6.	KAYNAKLAR	76

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
a*	Kırmızı-yeşil renk koordinatı
b*	Sarı-mavi renk koordinatı
C*	Renk doygunluğu
Δa	Kırmızı-yeşil eksenindeki değişim
Δb	Sarı-mavi eksenindeki değişim
ΔE	Toplam renk farkı
ΔL	Renk açıklığındaki değişim
g/cm ³	Yoğunluk
g/mol	Moleküler ağırlık
h°	Renk tonu açısı
L*	Renk açıklık değeri
MPa	Megapaskal
µm	Mikrometre
N/mm ²	Newton bölü milimetrekare
Nm	Nanometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz	Maksimum yüzey pürüzlülüğü

Kısaltmalar

2K	İki bileşenli sistem
ASTM 1413-76	Ahşap ve kaplama yüzeylerinde pürüzlülük ölçüm standardı
C18, C24	Karbon zincir uzunluğu (yağ asidi yapısı)
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
CIE Lab*	Renk ölçüm sisteminde kullanılan üç eksenli renk uzayı
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu
FTIR-ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıma – Fourier Dönüşümlü Kızılötesi
g/cm ³	Yoğunluk birimi (gram/santimetreküp)
g/mol	Moleküler ağırlık birimi (gram/mol)
HALS	Hindered Amine Light Stabilizer
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi (<i>Life Cycle Assessment</i>)
LCC	Yaşam Döngüsü Maliyeti (<i>Life Cycle Cost</i>)
MgO	Magnezyum Oksit
MOE	Elastikiyet Modülü (<i>Modulus of Elasticity</i>)
MOR	Eğilme Direnci (<i>Modulus of Rupture</i>)
SiO ₂	Silisyum Dioksit (Silika)
TiCl ₄	Titanyum Tetraklorür
TiO ₂	Titanyum Dioksit
TiOSO ₄	Titanyum Oksisülfat
UV	Ultraviyole Işınım
UVA	Ultraviyole-A ışınımı
VOC	Uçucu Organik Bileşikler (<i>Volatile Organic Compounds</i>)
ZnO	Çinko Oksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Deney Örneği	22
Şekil 3.2. $CIE L^*a^*b^*$ renk alanı	26
Şekil 3.3. Gloss-metrenin ölçüm prensibi	28
Şekil 3.4. Ortalama (R_a) ve on nokta ortalama (R_z) yüzey pürüzlülüğü	30
Şekil 4.1. L^* parametresi ortalama değerleri	34
Şekil 4.2. a^* parametresi ortalama değerleri	38
Şekil 4.3. b^* parametresi ortalama değerleri	43
Şekil 4.4. C^* parametresi ortalama değerleri	46
Şekil 4.5. h° parametresi ortalama değerleri	51
Şekil 4.6. Liflere dik yönde parlaklık değerleri	55
Şekil 4.7. Liflere dik yönde parlaklık değerleri	59
Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülüğü analiz R_a	62
Şekil 4.9 Yüzey pürüzlülüğü analiz R_q	66
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü analiz R_z	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. L^* parametresine ait varyans analizi sonuçları	31
Çizelge 4.2. L^* parametresine ait ölçüm sonuçları	32
Çizelge 4.3. a^* parametresine ait varyans analizi sonuçları.....	35
Çizelge 4.4 a^* parametresine ait ölçüm sonuçları.....	36
Çizelge 4.5. b^* parametresine ait varyans analizi sonuçları.....	40
Çizelge 4.6 b^* parametresine ait ölçüm sonuçları.....	41
Çizelge 4.7. C^* parametresine ait varyans analizi sonuçları	44
Çizelge 4.8. C^* parametresine ait ölçüm sonuçları	45
Çizelge 4.9. h° parametresine ait varyans analizi sonuçları	48
Çizelge 4.10. h° parametresine ait ölçüm sonuçları	49
Çizelge 4.11. Liflere dik yönde parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçları	52
Çizelge 4.12. Liflere dik yönde parlaklık değerlerine ait ölçüm sonuçları	53
Çizelge 4.13. Liflere paralel yönde parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçları	56
Çizelge 4.14. Liflere paralel yönde parlaklık değerlerine ait ölçüm sonuçları	56
Çizelge 4.15. R_a parametresine ait varyans analizi sonuçları	60
Çizelge 4.16. R_a parametresine ait ölçüm sonuçları	61
Çizelge 4.17. R_q parametresine ait varyans analizi sonuçları	63
Çizelge 4.18. R_q parametresine ait ölçüm sonuçları	64
Çizelge 4.19. R_z parametresine ait varyans analizi sonuçları	67
Çizelge 4.20. R_z parametresine ait ölçüm sonuçları	68

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1. Deney örneklerinin hazırlanması	23
Resim 3.2. Deneylerde kullanılan dispersiyon cihazı	24
Resim 3.3. Vernik karışımlarının hazırlanması	24
Resim 3.4. Farklı ağaç türlerine ve nano katkı oranlarına göre vernik uygulama	25
Resim 3.5. Renk ölçüm cihazı.....	26
Resim 3.6. Gloss-metre (parlaklık ölçer)	27
Resim 3.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	29



1. GİRİŞ

Ahşap; yenilenebilir, estetik ve çevre dostu bir malzeme olmasına rağmen, doğası gereği dış etkilere karşı hassasiyet göstermektedir. Özellikle dış mekân uygulamalarında güneş ışınlarından kaynaklanan ultraviyole (UV) radyasyonu, nem ve sıcaklık değişimleri ile mantar ve böcek gibi biyolojik etkenler ahşapta çeşitli bozunmalara yol açmaktadır. Bu etkiler, malzemenin boyutsal kararlılığını zayıflatarak çatlama ve şekil bozukluklarına, mekanik dayanımın azalmasına ve estetik görünümünde renk değişimi, solma ya da kararma gibi olumsuzluklara neden olmaktadır. Böylece ahşabın uzun süreli kullanım potansiyeli düşmekte ve çelik ile beton gibi alternatif yapı malzemeleri karşısında rekabet gücü sınırlanmaktadır (Das ve Mahapatra, 2024).

Günümüzde doğal kaynakların bilinçsizce tüketilmesi, yenilenebilir hammadde olan ahşabın korunmasını ve kullanım ömrünün uzatılmasını zorunlu kılmaktadır. Ahşabın bu zayıf yönlerini azaltmak amacıyla yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelik ısıtma işlemi, emprenye ve yüzey kaplama gibi modifikasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Isıtma işlemi, kimyasal madde kullanılmadan ahşabın boyutsal kararlılığını artıran çevre dostu bir yöntem olmakla birlikte, UV ışınları gibi dış etkenlere karşı tek başına yeterli koruma sağlayamamaktadır. Bu nedenle, ahşabın uzun ömürlü ve dayanıklı hale getirilmesi için koruyucu yüzey kaplamalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Karamanoğlu, 2020).

Nanoteknoloji, son yıllarda farklı sektörlerde olduğu gibi ahşap endüstrisinde de önemli yenilikler ve gelişmeler sunmaktadır. Nanobilim; atom ve molekül düzeyinde malzemelerin yapı ve dinamik özelliklerini inceleyen disiplinler arası bir alan iken, bu temel bilgilerden doğan nanoteknoloji, malzeme ve üretim süreçlerinde köklü değişiklikler yaratma potansiyeline sahiptir (Candan ve Akbulut, 2015). Gelişmiş ülkeler nanoteknolojiyi stratejik bir alan olarak benimsemiş, bu doğrultuda Ar-GE yatırımlarını artırmıştır. Türkiye’de de 2000’li yıllardan itibaren nanoteknoloji alanında laboratuvarlar kurulmuş, özellikle Vizyon 2023 Strateji Belgesi ile nanoteknoloji ülkenin öncelikli teknoloji alanlarından biri olarak tanımlanmıştır (Candan ve Akbulut, 2015; T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2017).

Geleneksel ahşap koruma teknikleri bu sorunlara kısmen çözüm getirse de, ahşabın ömrünü belirgin şekilde uzatmak ve performansını artırmak için daha gelişmiş çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada nanoteknoloji, ahşabın doğal zayıf yönlerini ortadan kaldırarak malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmeyi hedefleyen en yenilikçi araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Candan ve Akbulut, 2015; Das ve Mahapatra, 2024). Ayrıca, çevreye zararlı uçucu organik bileşiklerin (VOC) emisyonlarının azaltılması ve formaldehit içermeyen yeni nesil reçinelerin geliştirilmesi gibi çevresel kazanımlar da bu teknolojiyi daha sürdürülebilir kılmaktadır (Jasmani, Rusli, Khadiran vd., 2020).

Nanoteknolojik yaklaşımlar, ahşap işleme süreçlerinde enerji tüketimini azaltmak, üretim verimliliğini artırmak ve atık miktarını düşürmek gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, ahşap ürünlerinin geri dönüştürülebilirliğini geliştirmek ve üretimden tüketime kadar izlenebilirlik sistemleri oluşturmak da mümkün hale gelmiştir. Özellikle nano metal oksitler ve nanocellulose gibi malzemeler, ahşabın mekanik dayanımını artırmak, yüzey korumasını güçlendirmek ve biyolojik bozunmalara karşı direnç kazandırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlamakla birlikte, ahşap bazlı ürünlerin katma değerini artırarak endüstriyel çeşitliliği desteklemektedir (Jasmani, Rusli, Khadiran vd., 2020).

Son yıllarda çevreye duyarlı su bazlı verniklerin, inorganik nanoparçacık katkılarıyla dayanımının artırılması yönünde yapılan çalışmalar da önem kazanmıştır. Nano inorganik UV emiciler, kaplama malzemesinden ayrılmadıkları için dış ortam koşullarında uzun süreli UV koruması sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, Titanyum Dioksit (TiO_2) ve Silisyum Dioksit (SiO_2) gibi nanopartiküller, ahşap yüzeylerde verniklerin performansını artırmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışma, ahşap malzemelerin yüzey özelliklerinde Titanyum Dioksit (TiO_2) ve Silisyum Dioksit (SiO_2) nanopartikülleri ile modifiye edilmiş verniklerin etkilerini incelemek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada, nanoteknolojinin geleneksel vernik sistemlerinin sınırlamalarını aşarak ahşabın dış ortam dayanımı, mekanik stabilitesi ve

hidrofobikliğini artırmadaki rolü değerlendirilmiştir. Kapsam dahilinde, farklı yoğunluklara sahip kızılçam ve iroko (*Pinus brutia* ve *Chlorophora excelsa*) ağaç türleri üzerinde, iki farklı vernik tipi ve iki farklı nanopartikül katkı oranı (%1 ve %2) uygulanarak yüzey özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Renk, parlaklık ve pürüzlülük gibi yüzey parametreleri standart yöntemlerle belirlenmiş ve elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma, nano kaplamaların ahşap yüzeylerdeki etkileşim mekanizmalarının anlaşılmasına ve optimum nanopartikül kullanımının belirlenmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, elde edilen bulguların ahşap yüzey kaplama teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımlara ışık tutması ve ileride yapılacak akademik araştırmalara teorik ve deneysel bir temel oluşturması hedeflenmektedir

1.1.Nanobilim ve Nanoteknolojiye Genel Bakış

Nanoteknoloji, maddelerin atomik, moleküler ve makromoleküler düzeylerde kontrollü bir şekilde işlenmesi, tasarlanması ve dönüştürülmesi sürecini ifade etmektedir. “Nano” öneki, 10^{-9} (bir milyarda bir) ölçeğini belirtmekte olup kökenini Yunanca “cüce” anlamına gelen *nanos* kelimesinden alır. Bu alan, malzeme bilimi, kimya, fizik ve mühendislik gibi farklı disiplinlerin kesişiminde yer almakta ve disiplinler arası yapısı sayesinde hızla gelişmektedir. Ulusal Nanoteknoloji Girişimi (NNI) tarafından yapılan tanıma göre nanoteknoloji, yaklaşık 1–100 nanometre (nm) aralığında maddenin özelliklerini anlamayı, kontrol etmeyi ve bu ölçekte yeni fonksiyonlar kazandırmayı hedefler. Bu ölçek, maddenin makro düzeyde göstermediği özgün fiziksel, kimyasal ve mekanik davranışların ortaya çıkmasına olanak tanır. Nanoteknolojinin kapsamı, bu boyuttaki materyallerin gözlemlenmesi, ölçülmesi, modellenmesi ve modifiye edilmesi (örneğin yüzey fonksiyonlandırma veya kaplama uygulamaları) gibi çok boyutlu mühendislik ve bilimsel süreçleri içermektedir (İnt. Kyn. 7; İnt. Kyn. 8).

Malzemelerin nanometre ölçeğine indirgenmesi, klasik boyutlarda gözlenmeyen bir dizi fiziksel ve kimyasal özellik değişimini beraberinde getirir. Bu değişimlerin mekanizmasının anlaşılması, özellikle nanokompozit kaplama sistemlerinin performansını geliştirmek açısından büyük önem taşır. Nanomalzemelerin en ayırt edici

yönü, oldukça yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olmalarıdır. Parçacık boyutu küçüldükçe, birim hacim başına düşen yüzey alanı katlanarak artar. Bu durum, malzemenin yüzey enerjisini yükselterek kimyasal reaktiviteyi, katalitik etkinliği ve özellikle yüzey etkileşim kapasitesini artırır. Böylece çok küçük miktarlarda nanoparçacık eklenmesi bile, mikron boyutundaki dolgu maddelerine kıyasla UV koruma, hidrofobiklik veya mekanik güçlendirme gibi işlevleri daha etkin bir biçimde sağlayabilir (Papadopoulos vd., 2019).

Nanoteknoloji, yalnızca boyut küçültmeye değil, boyutla birlikte değişen işlevsel özelliklerin optimizasyonuna da odaklanmaktadır. Parçacık boyutu dağılımı, optik, elektriksel ve mekanik davranışlar üzerinde belirleyici bir faktördür. Bu nedenle nanomalzemelerin yüzey özelliklerinin doğru şekilde karakterize edilmesi, nano düzeydeki değişimlerin makro ölçekteki etkilerini değerlendirmek açısından temel bir gerekliliktir. Bununla birlikte, nanoteknolojinin hızlı gelişimi yeni endüstriyel olanaklar yaratırken, aynı zamanda çevresel güvenlik ve etik konulara dair soru işaretleri de doğurmaktadır. Nanoparçacıkların doğadaki davranışları tam olarak açıklığa kavuşmadığından, sızıntı (leaching) riski, çevreye olası etkiler ve Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) kapsamındaki değerlendirmeler, teknolojik ilerleme süreciyle paralel biçimde dikkate alınmalıdır (Papadopoulos vd., 2019; Yıldırım, 2021).

1.2. Ağaç Malzeme ve Nanoteknoloji İlişkisi

Nanoteknoloji, maddelerin atomik ve moleküler düzeyde kontrol edilerek tasarlanması, işlenmesi ve dönüştürülmesini konu alan disiplinler arası bir bilim alanıdır. Genellikle 1–100 nanometre (nm) boyut aralığında çalışan bu teknoloji, malzemelere makro ölçekte görülmeyen özgün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler kazandırır. Parçacık boyutunun küçülmesiyle birlikte yüzey alanı/hacim oranı önemli ölçüde artar; bu da malzemelerin reaktivitesini, yüzey enerjisini ve çevresiyle etkileşim kapasitesini belirgin şekilde yükseltir. Bu özellikler sayesinde nanoteknoloji, yalnızca minyatürleştirme değil, aynı zamanda malzemelerin optik, mekanik, elektriksel ve kimyasal özelliklerinin optimize edilmesine yönelik bir mühendislik yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle yüzey modifikasyonu ve kaplama teknolojilerinde, nanomalzemelerin

kullanımı malzeme performansını artıran yenilikçi çözümler sunmaktadır (İnt. Kyn. 9, 2025; İnt. Kyn. 10, 2025).

Nanoteknoloji, ahşap malzemenin geleneksel zayıflıklarını — higroskopisite, ultraviyole (UV) ışınlarına karşı hassasiyet ve biyolojik bozunma eğilimi gibi — azaltmak amacıyla geliştirilen yenilikçi, çok yönlü ve çevre dostu bir yaklaşımdır. Ahşabın mikroyapısal düzeyde sahip olduğu gözenekli hücre duvarı, özellikle selüloz mikrofibrilleri arasındaki nanometre ölçekli boşluklar, nanomalzemelerin etkin bir biçimde nüfuz edebilmesine olanak tanımaktadır. Bu doğal gözeneklilik, nanoteknolojinin ahşapla bütünleşmesini sağlayan en kritik faktörlerden biridir. 100 nanometreden daha küçük boyutlu nanoparçacıklar, bu mikroskobik yapıya derinlemesine yerleşerek ahşabın yüzey enerjisini ve kimyasal reaktivitesini değiştirebilir, böylece malzemenin fiziksel ve kimyasal dayanım özelliklerini kökten dönüştürebilir. Bu sayede nanoteknolojik modifikasyonlar, klasik emprenye yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda “yüksek performanslı” ve uzun ömürlü ahşap ürünlerin geliştirilmesine olanak tanır (Papadopoulos vd., 2019).

Nanomalzeme katkılarıyla elde edilen bu modifikasyonlar, temelde üç ana işlevsel iyileşmeyi hedeflemektedir: boyutsal stabilite, biyolojik dayanıklılık ve UV koruması. Boyutsal stabilite açısından, nanoparçacıkların hücre duvarına yerleşmesi gözenek boyutlarını azaltarak su moleküllerinin difüzyonunu sınırlar ve ahşabın higroskopik davranışını belirgin biçimde düşürür. Böylece, ahşap nem değişimlerine karşı daha kararlı hale gelir ve çatlama, eğilme ya da deformasyon gibi problemler en aza iner. Biyolojik direnç yönünden, nemin sınırlanması dolaylı koruma sağlarken, TiO_2 ve ZnO gibi inorganik nano oksitler doğrudan antimikrobiyal etki gösterir. Bu tür malzemeler, fotokatalitik mekanizmalar yoluyla mikroorganizmaların hücre zarlarını parçalayabilir veya zararlı organik bileşenleri bozundurarak ahşabın mantar, küf ve böceklere karşı direncini artırabilir (Papadopoulos vd., 2019).

Ayrıca, UV ışınlarına karşı foto-stabilite kazandırılması da nanoteknolojinin en dikkat çekici katkılarından biridir. Nano boyutlu inorganik dolgu maddeleri (örneğin TiO_2 ve SiO_2), geniş yüzey alanı/hacim oranı sayesinde 370 nm altındaki UV ışınlarını etkin

biçimde absorbe eder ya da yansıtarak lignin bozunmasını yavaşlatır. Bu durum, ahşabın renk kararlılığını uzun süre korumasına ve yüzeyin güneş ışığı kaynaklı solma veya çatlama gibi sorunlardan korunmasına yardımcı olur. Dolayısıyla nanoteknoloji, yalnızca ahşabın dayanıklılığını ve performansını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilir ormancılık ve çevre dostu malzeme teknolojileri açısından da yeni bir paradigma sunmaktadır. Bu kapsamda, nanoteknolojik yaklaşımlar, doğal bir kaynak olan ahşabın daha uzun ömürlü, yüksek performanslı ve çok amaçlı bir mühendislik malzemesine dönüştürülmesinde stratejik bir rol üstlenmektedir (Papadopoulos vd., 2019; Spear vd., 2021).

1.3. Kullanılan Ağaç Malzemenin Temel Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmanın temel amacı, nanopartiküller (TiO_2 ve SiO_2) ile modifiye edilen verniklerin farklı ağaç türleri üzerindeki bazı yüzey özelliklerine etkisini incelemektir. Bu kapsamda, Türkiye’de yaygın olarak yetişen ve endüstride sıkça kullanılan Kızılçam (*Pinus brutia*) ile ithal, yüksek yoğunluklu ve dayanıklı tropik bir tür olan İroko (*Chlorophora excelsa/Milicia excelsa*) deneysel çalışma kapsamında seçilmiştir. Kızılçam, yerli ve hızlı büyüyen bir tür olarak düşük yoğunluklu yumuşak ağaç grubunu temsil ederken, İroko, üstün fiziksel ve mekanik özellikleriyle yüksek yoğunluklu sert ağaç grubunu temsil etmektedir. Bu iki türün seçimi, farklı anatomik yapı ve yüzey özelliklerine sahip odunların, nanopartikül katkılı vernik uygulamalarına verdikleri tepkilerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

1.3.1. Kızılçam (*Pinus brutia*)

Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.), Pinaceae familyasına ait, Doğu Akdeniz florasının karakteristik ağaç türlerinden biridir. Doğal yayılış alanı Yunanistan’ın doğusundan başlayarak Girit, Kıbrıs, Türkiye, Suriye, Irak, Lübnan ve Ürdün’e kadar uzanmakta olup, en geniş popülasyonlarını Türkiye sınırları içerisinde bulundurmaktadır. Yaklaşık 20 metreye kadar boylanabilen, her dem yeşil ve kalın dallı bir tür olan Kızılçam, gövde ve dal kabuklarının kırmızımsı rengi nedeniyle bu adla anılmaktadır. Türkiye’de hem doğal yayılış göstermesi hem de hızlı büyüme özelliği nedeniyle ormancılık, inşaat, mobilya ve

levha endüstrisinde önemli bir hammadde kaynağı konumundadır. Derin kazık kök yapısı toprağa güçlü tutunma sağlarken, kalın kabuğu yüzey yangınlarına karşı belirli bir direnç oluşturur. Ancak, fırtına ve kuvvetli rüzgârlara karşı hassasiyet göstermesi, sıg topraklarda devrilme riskini artırmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklara karşı duyarlı olup, biyotik stres faktörlerinden özellikle Çam kese böceği (*Thaumatopoea pityocampa*) zararıyla sıklıkla etkilenmektedir (Orman Genel Müdürlüğü, t.y.; Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi, t.y.).

Kızılçam ahşabı, kolay işlenebilir yapısı ve geniş kullanım alanı sayesinde yapı malzemesi, mobilya iskeletleri ve ambalaj sanayisi gibi yüksek hacimli üretim alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Yapısal amaçla kullanılacak kerestelerde malzeme kalitesinin, mekanik dayanımın ve güvenliğin standartlara uygun şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, Kızılçam keresteleri yoğunluk ve eğilme direnci (Modulus of Elasticity - MOE) gibi temel fiziksel ve mekanik özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmekte ve TS EN 338 standardı doğrultusunda C18, C24 gibi belirli dayanım sınıflarına ayrılmaktadır (Güntekin ve Yılmaz, 2012; Orman Genel Müdürlüğü, t.y.).

Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.), yumuşak odun (softwood) grubunda yer alan iğne yapraklı bir tür olup Türkiye’de en yaygın doğal yayılışa ve en yüksek büyüme hızına sahip ibreli türlerden biridir. Bu özellikleri, onu ulusal inşaat, ambalaj ve levha sanayileri için stratejik öneme sahip, düşük maliyetli bir hammadde kaynağı haline getirmektedir. Yüksek yıllık kesim potansiyeli sayesinde ülkenin yapısal ahşap arzında dışa bağımlılığın azalmasına katkı sağlamakta ve yerli üretim açısından ekonomik bir tampon görevi üstlenmektedir. Bununla birlikte, Kızılçam odununun yoğunluğu %12 nem oranında 0.397–0.590 g/cm³ arasında değişmekte olup, bu fark yetiştirme ortamı, iklim koşulları ve ağaç yaşı gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Yoğunluk varyasyonunun geniş olması, malzemenin mekanik özelliklerinde homojenliğin sağlanmasını güçleştirmekte ve özellikle yüksek dayanım sınıfı gerektiren yapısal uygulamalarda (örneğin C24 sınıfı) kalite sınıflandırma süreçlerinin titizlikle yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Kızılçam odunu, düşük Janka sertliği sayesinde işlenmesi kolay bir malzemedir; ancak mekanik dayanım bakımından sınırlı özellikler sergiler. Öz odunu orta ile düşük doğal dayanıklılık düzeyindedir ve dış ortam koşullarına maruz kalacak uygulamalarda kimyasal veya

termal koruma işlemleri gerektirir. Ayrıca yüksek çekme (volumetrik) eğilimi göstermesi nedeniyle nem değişimlerine bağlı boyutsal kararsızlık gözlenebilmektedir. Bu özellikleri doğrultusunda Kızılçam, genellikle yapısal çerçeve elemanları, ambalaj ve palet üretimi, kontrplak ve geçici yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Uygun yüzey koruma yöntemleri uygulandığında ise dış cephe kaplamaları ve dekoratif ahşap uygulamaları için de tercih edilebilmektedir (Güller, 2010; Güntekin ve Yılmaz, 2012; Orman Genel Müdürlüğü, t.y.).

1.3.2. İroko (*Chlorophora excelsa*)

İroko (*Milicia excelsa*, syn. *Chlorophora excelsa*), Afrika kıtasına özgü, geniş yapraklı bir tropikal ağaç türüdür ve sert odun (hardwood) grubunda yer almaktadır. Botanik literatürde uzun süre *Chlorophora excelsa* olarak anılmış olsa da, güncel sınıflandırmalarda *Milicia excelsa* ismi yaygın olarak kullanılmaktadır. İroko kerestesi, taze kesildiğinde açık sarı tonlarında olup zamanla oksidasyon etkisiyle açık kahverengiye dönüşür ve sıklıkla altın yansımalar içeren bir görünüm kazanır. Odunun dokusu kaba (coarse) olup, karakteristik şekilde birbirine geçmiş damar yapısı (interlocked grain) ile tanımlanır. Bu damar yapısı, yüzeyde estetik bir desen oluşturmakla birlikte, işleme sırasında yırtılma (tear-out) ve kıymıklanma gibi zorluklara yol açabilmektedir (İnt. Kyn. 1; İnt. Kyn. 2; İnt. Kyn. 3).

İroko, yüksek yoğunluk ve üstün mekanik dayanım özellikleriyle bilinen bir türdür. Ortalama yoğunluğu %12 nem oranında yaklaşık 0,66 g/cm³ olup, bazı örneklerde 0,78 g/cm³'e kadar çıkabilmektedir. Bu yoğunluk seviyesi, malzemenin sert ve dayanıklı bir yapı göstermesini sağlar. Janka sertliği 1.190–1.540 lbf aralığındadır ve bu değerler, İroko'nun darbe, çizik ve aşınmaya karşı yüksek direnç sunduğunu ortaya koymaktadır. Eğilme direnci (MOR) yaklaşık 97,1 MPa, elastikiyet modülü (MOE) ise 10,9 GPa civarındadır; bu özellikler türü, zemin kaplamaları ve yük taşıyan yapısal elemanlar için uygun hale getirir (İnt. Kyn. 4; İnt. Kyn. 5)

İroko'nun en belirgin avantajlarından biri, doğal dayanıklılığıdır. Öz odunu, bünyesindeki yüksek ekstraktif madde ve yağ içeriği sayesinde mantarlara, termitlere ve

deniz kurtlarına karşı son derece dirençlidir. Bu nedenle, dış ortam veya sürekli nem etkisindeki koşullarda ek kimyasal koruma (emprenye) gerektirmeden uzun ömürlü performans gösterebilmektedir. Düşük hacimsel çekme oranı (yaklaşık %8,8) ise yüksek boyutsal stabilite sağlayarak, nem değişimlerine bağlı deformasyon riskini azaltır. Bununla birlikte, İroko'nun işlenmesi bazı zorluklar barındırır. Birbirine geçmiş damar yapısı, kesme ve yüzey işlemleri sırasında dikkatli bir teknik uygulama gerektirir. Ayrıca, odun içerisinde zaman zaman rastlanan kalsiyum karbonat birikintileri, kesici aletlerin hızlı körelmesine neden olur ve işleme maliyetlerini artırır. Bu durum, üretim sürecinde özel kesici uçlar (örneğin karbür uçlu bıçaklar) ve yüksek bakım gereksinimi doğurarak dolaylı maliyetleri etkileyebilir (İnt. Kyn. 5; İnt. Kyn. 6).

İroko, doğal dayanıklılığı ve estetik görünümü sayesinde özellikle tik ağacına ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Dış cephe kaplamaları, zemin döşemeleri, iskele ve deniz yapıları, gemi ve tekne inşası, kapı-pencere doğramaları, mobilya ve dekoratif iç mekân tasarımlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Kimyasal koruma ihtiyacının bulunmaması, yüksek ithalat maliyetine karşı malzemenin yaşam döngüsü maliyetini (LCC) düşürmekte ve uzun vadede ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, kalite kontrol süreçlerinde yalnızca öz odunun kullanılması tercih edilmeli; çünkü diri odun böcek saldırılarına karşı daha hassastır. Bu yaklaşım, dayanıklılığın korunmasını sağlarken, verim ve fiyat dengesini belirleyen önemli bir kalite standardı oluşturmaktadır (İnt. Kyn. 3; İnt. Kyn. 5; İnt. Kyn. 6).

1.4. Kullanılan İnorganik Katkılar (TiO_2 , SiO_2) ve Çift Komponentli Polimer Sistemlerin (Epoksi, Akrilik) Temel Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Kaplama teknolojisi, yalnızca yüzeylerin estetik görünümünü iyileştiren veya koruyucu bir tabaka oluşturan bir işlem olmaktan çıkmış, kimyasal, mekanik ve çevresel etkilere karşı uzun ömürlü direnç sağlayan ileri düzey bir malzeme bilimi alanına dönüşmüştür. Günümüzde yüksek performanslı kaplamalar, polimer matrisin dayanımına ek olarak, titanyum dioksit (TiO_2) ve silika (SiO_2) gibi inorganik katkı maddelerinin sinerjik etkilerinden yararlanarak çok yönlü işlevler kazanmıştır. Bu katkılar, kaplama filminin optik (beyazlık, opaklık), reolojik (uygulama kolaylığı) ve mekanik (sertlik, çizilme

direnci) özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle epoksi ve akrilik esaslı çift komponentli (2K) vernik sistemlerinde, TiO_2 pigmentleri UV ışınlarına karşı etkin bir bariyer oluştururken, SiO_2 nanoparçacıkları polimer ağın sertliğini artırarak kaplamanın mekanik dayanımını ve ömrünü uzatmaktadır. Bu çalışma, söz konusu oksit katkıları ile reçine sistemleri arasındaki yapı-fonksiyon ilişkilerini inceleyerek, modern kaplama formülasyonlarının performansını belirleyen sinerjik mekanizmaları ortaya koymayı amaçlamaktadır.

1.4.1. Titanyum Dioksit (TiO_2)

Titanyum dioksit (TiO_2), ilmenit, rutil ve anatas gibi minerallerde doğal olarak bulunan beyaz renkli bir inorganik oksittir. Kimyasal formülü TiO_2 olan bu bileşik, 79.866 g/mol molekül ağırlığına, 4.23 g/cm³ yoğunluğa, 1843 °C erime noktasına sahip olup suda çözünmez bir yapı gösterir. Yüksek yansıtıcılık ve UV ışınlarını engelleme özelliği sayesinde boya, plastik, kozmetik ve gıda gibi birçok endüstride pigment ve UV filtresi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel ölçekte üretimi genellikle iki yöntemle yapılır: klor prosesi ve sülfat prosesi. Klor prosesi, ilmenit veya rutilin klor ile reaksiyona sokularak titanyum tetraklorür (TiCl_4) elde edilmesi ve bunun oksijenle yakılarak yüksek saflıkta TiO_2 üretilmesi esasına dayanır. Sülfat prosesi ise daha ekonomik olmakla birlikte, sülfürik asit ile tepkime sonucu oluşan titanyum sülfat (TiOSO_4) üzerinden daha düşük saflıkta ürün verir. Klor prosesiyle elde edilen yaklaşık %99,5 saflıktaki TiO_2 , özellikle UV dayanımı yüksek, fotokatalitik aktivitenin istenmediği dış cephe akrilik vernikleri gibi uygulamalarda tercih edilir. Bu tür yüksek saflıktaki TiO_2 , reçine bozunmasını azaltarak kaplama sistemlerinde uzun ömür ve stabilite sağlar (İnt. Kyn. 11, 2025).

Titanyum dioksit (TiO_2), kaplama endüstrisinde en yaygın kullanılan inorganik pigmentlerden biridir ve başlıca iki kristal formda bulunur: rutil ve anataz. Rutil formu yüksek yoğunluğu, kırılma indisi ve mükemmel UV dayanımı sayesinde uzun ömürlü dış cephe ve otomotiv kaplamalarında tercih edilir. Buna karşılık, anataz formu daha düşük yoğunluğa sahip olup yüksek fotokatalitik aktivitesi nedeniyle kendini temizleyen yüzeylerde veya çevresel uygulamalarda kullanılır. Nanometrik boyuttaki TiO_2

parçacıkları (10–30 nm), yüksek yüzey alanı ve gelişmiş UV soğurma özellikleriyle kaplamalarda, güneş koruyucularda ve cam kaplamalarında etkili bir UV filtresi ve optik iyileştirici olarak önemli avantajlar sağlar (İnt. Kyn. 12, 2025).

1.4.2. Silika (SiO₂)

Silika (SiO₂), kaplama formülasyonlarında hem dolgu maddesi hem de fonksiyonel katkı ajanı olarak önemli bir rol oynar. Silika ilavesi, kaplamaların aşınma ve hava koşullarına karşı dayanıklılığını artırırken, özellikle silanla modifiye edilmiş koloidal silika parçacıkları su bazlı verniklerde sertlik ve çizilme direncini belirgin biçimde geliştirir. Kaplama filmine entegre edildiğinde fiziksel bir takviye sağlayarak polimer matrisin iç gerilimlere ve dış mekanik etkilere karşı direncini yükseltir. Ayrıca silika, reolojik düzenleyici olarak da işlev görür. Tiksotropik davranışı sayesinde, uygulama sırasında sarkmayı ve kenar kalınlaşmalarını önleyerek homojen film kalınlığı elde edilmesini kolaylaştırır. Bu özellik, özellikle yüksek viskoziteli epoksi veya solventsiz kaplamalarda film stabilitesi ve yüzey düzgünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanında, pigment çökmesini engelleyerek boyaların depolama kararlılığını da artırır. Dolayısıyla silika, kaplamaların hem mekanik hem de reolojik performansını iyileştirerek uzun ömürlü ve yüksek kaliteli yüzeyler elde edilmesine katkı sağlar (İnt. Kyn. 13, 2025).

Silika hem solvent bazlı hem de su bazlı kaplamalarda en yaygın kullanılan inorganik matlaştırma maddesidir. Matlaştırma işlemi, kaplama filmine eklenen silika parçacıkları sayesinde yüzeyde mikro pürüzlülük oluşturarak ışığın dağınık yansımaları sağlar ve böylece parlaklık azalır. Silika içermeyen vernikler düz ve parlak bir yüzey oluştururken, silika katkılı filmler mat veya saten görünümlü bir yüzey sunar. Silika, yalnızca estetik bir matlık kazandırmakla kalmaz; aynı zamanda kaplamanın sertliğini, aşınma ve çizilme direncini de artırarak dayanıklı bir yüzey oluşumuna katkıda bulunur (İnt. Kyn. 13, 2025).

1.4.2. Epoksi Reçine

Epoksi reçine esaslı sistemler, yapı ve endüstriyel uygulamalarda yüksek performanslı termoset polimerler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemler, epoksit

grupları içeren bir reçine ile kimyasal reaksiyonu başlatan bir sertleştiriciden oluşur. Epoksi reçineler, mükemmel yapışma gücü, yüksek mekanik dayanım, ısı ve kimyasal direnç gibi üstün özellikleri sayesinde tercih edilir. Kürleme sürecinde amin veya poliamid sertleştiriciler, epoksi halkasını açarak kovalent bağlar oluşturur ve üç boyutlu çapraz bağlı bir ağ yapısı meydana getirir. Bu ağ, epoksinin suya, asitlere, alkalilere ve deniz suyuna karşı dayanıklılığını artırır. Kürleme sıcaklığı reaksiyon hızını belirler; yüksek sıcaklıklar hızlı kürleme sağlasa da iç gerilmeleri artırabilir. Bu nedenle endüstriyel zemin uygulamalarında kontrollü kürleme koşulları, çatlak ve soyulmaları önlemek açısından büyük önem taşır (İnt. Kyn. 14, 2025).

Epoksi kaplamalar, yüksek parlaklık, kimyasal direnç ve hijyenik yüzey özellikleriyle endüstriyel tesislerde, özellikle gıda ve ilaç üretim alanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak bu reçinelerin en belirgin kısıtlaması, ultraviyole (UV) ışığa karşı düşük dayanımlarıdır. UV maruziyeti, oksidatif serbest radikal reaksiyonları yoluyla sararmaya ve polimer zincirlerinin zayıflamasına neden olur. Bu etkiyi azaltmak için formülasyonlara UV emiciler (UVA) ve engellenmiş amin ışık stabilizatörleri (HALS) eklenir. UVA katkıları UV ışığını soğurarak ısıya dönüştürürken, HALS radikalleri nötralize eder. Ancak bu katkıların zamanla filminden göç etme eğilimi, uzun vadede renk ve parlaklık kaybını tamamen önleyemez. Dolayısıyla epoksi reçineler, üstün kimyasal ve mekanik performanslarına karşın, dış mekan yerine iç mekân kaplamalarında tercih edilmelidir (İnt. Kyn. 15, 2025; İnt. Kyn. 16, 2025).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Zhou vd. (2008), yapmış oldukları çalışmada, solvent bazlı akrilik, polyester bazlı poliüretan ve su bazlı akrilik kaplamalarda kullanılan nano-SiO₂, nano-TiO₂ ve nano-ZnO parçacıklarının dispersiyon (dağılma) ve UV-VIS özelliklerini incelemektedir. Nanopartiküllerin dispersiyonu; partikül tipi, kaplama sistemi ve karıştırma yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek hızlı karıştırma, top değirmeni ve in situ polimerizasyon yöntemleri arasında en iyi dispersiyon IS yöntemi ile elde edilmiştir. UV koruma performansı açısından nano-ZnO en etkili sonuçları vermiştir. Nano-TiO₂ ve nano-SiO₂ de UV koruma sağlamış, ancak yüksek partikül yoğunluğu kaplamaların şeffaflığını azaltmıştır. Özellikle hidrofobik nano-SiO₂ daha iyi dispersiyon göstermiştir. Nanopartiküllerin eklenmesi kaplamaların sertlik, aşınma direnci ve UV dayanımını artırırken, aşırı konsantrasyon şeffaflık ve esnekliği olumsuz etkilemiştir.

Rassam vd. (2011), yapmış oldukları çalışmada, TiO₂ nanopartiküllerinin ahşap yüzeylere uygulanarak UV ışığına ve neme karşı dayanıklılığı artırma potansiyelini incelemiştir. Sol-jel yöntemiyle sentezlenen TiO₂, daldırma kaplama ve tavlama işlemleriyle ahşap yüzeyine uygulanmış; FESEM ve FTIR analizleriyle yüzey yapısı ve kimyasal etkileşimler değerlendirilmiştir. Bulgular, TiO₂ kaplamanın UV kaynaklı lignin bozunmasını azalttığını, yüzeye hidrofobik özellik kazandırdığını ve yüzey dayanıklılığını artırdığını göstermiştir. Ayrıca fotokatalitik aktivitenin kontrol edilmesi, kaplama stabilitesini güçlendirmiştir. Sonuç olarak TiO₂ kaplamaları, ahşap yüzeylerin çevresel etkilere karşı korunmasında etkili bir yöntem olup, ZnO gibi diğer nanopartiküllerle birlikte kullanımı koruma performansını daha da artırabilir.

Yunlin vd., (2014), yapmış oldukları çalışmada, silika katkılı vernik uygulamasıyla ahşap yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Nano toz silika (modifiye edilmiş veya edilmemiş) poliüretan vernik içerisine eklenmiş ve karıştırıldıktan sonra ahşap yüzeyine uygulanmıştır. Bu yöntemle ahşap yüzeyin mekanik ve kimyasal direnç özellikleri önemli ölçüde artmış, üretim süreci sadeleşmiş, reaksiyon süresi kısalmış ve ürün kalitesi ile maliyet açısından verimlilik sağlanmıştır. Silika katkılı vernik yöntemi, özellikle ahşap

zemin kaplamaları, mobilya ve iç mekân dekorasyon malzemeleri için geniş uygulama potansiyeline sahiptir.

Ünal, (2016), yapmış olduğu çalışmada, sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve Doğu Kayını (*Fagus orientalis* L.) odunları üzerine SiO₂ ve TiO₂ nanopartikülleri ile modifiye edilen su bazlı ve cam cila verniklerinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Renk analizinde L* değeri Sarıçam'da %3 TiO₂ katkılı su bazlı vernikte (94.19), a* ve b* değerleri ise %1 SiO₂ katkılı cam cila vernikte en yüksek bulunmuştur. Parlaklık bakımından en yüksek değer Doğu Kayını'nda %1 TiO₂ katkılı cam cila vernikte (85.04) ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü en yüksek düzeyde %3 SiO₂ katkılı cam cila verniklerde tespit edilmiştir. Genel olarak, cam cila verniği yüksek parlaklık sağlamış, TiO₂ katkısı açık renk ve düzgün yüzey oluşturmuş, SiO₂ katkısı ise yapışma direncini artırmıştır. Bu sonuçlara göre, parlaklık istenen yüzeylerde cam cila verniği, yüksek yapışma dayanımı gereken yerlerde SiO₂ katkılı vernikler ve açık renkli yüzey elde edilmek istenen uygulamalarda TiO₂ katkılı verniklerin kullanılması önerilmektedir.

Zheng vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada, rutil TiO₂ nanoyapılarıyla kaplanmış ahşap yüzeylerin fotokatalitik aktivite nedeniyle bozunabileceğini incelemiştir. TiO₂ kaplı ahşaplar UV ışığı altında hidrofobikten hidrofilğe dönüşmüş, uzun süreli hava koşullarında ise kaplama kısmen soyulmuş ve yüzey zarar görmüştür. Rutil TiO₂ renk stabilitesini sınırlı ölçüde artırsa da fotokatalitik aktivite yüzey bozunmasına yol açmıştır. Sonuç olarak, TiO₂ kaplamaların dayanıklılığını artırmak için fotokatalitik etkinin azaltılması ve kaplamanın yüzeye güçlü biçimde sabitlenmesi önerilmektedir.

Atılğan vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada, ahşap yüzeylerde su bazlı vernik uygulamasının pürüzlülük özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve kayın (*Fagus orientalis* L.) odun türleri kullanılmış, ASTM D1413–76 standardına uygun olarak üretilen doğal çay boyasıyla renklendirilen örnekler su bazlı vernik uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, su bazlı vernik uygulanan örneklerde pürüzlülük değerlerinin belirgin biçimde azaldığı, en düşük pürüzlülük değerinin sarıçamda (1,05 µm), en yüksek değer ise kayında (1,33 µm) ölçüldüğü tespit

edilmiştir. Çalışma, su bazlı verniklerin ahşap yüzeylerin düzgünlüğünü artırarak estetik ve koruyucu performansını geliştirdiğini göstermektedir.

Atılğan vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada, insan ve çevreye zararsız doğal ahşap yüzey boyalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, çam (*Pinus sylvestris* L.), kayın (*Fagus orientalis* L.), köknar (*Abies* sp.) ve kavak (*Populus* sp. L.) odun yüzeylerine fırça ile çay boyası ve poliüretan esaslı tek ve çift bileşenli su bazlı vernikler uygulanmıştır. Renk değişimleri (ΔL , Δa , Δb , ΔE) ISO 2470 standardına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek toplam renk değişimi ($\Delta E = 99.512$) boraks katkılı çay boyası uygulanmış köknar örneklerinde elde edilmiştir. Bu bulgular, atık çay özütlerinin çevre dostu ve estetik yüzey işlemleri için mobilya endüstrisinde kullanılabilir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Ulusoy vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada, ladin (*Picea abies*) odunu ASTM 1413-76 standardına göre farklı vakum ve difüzyon sürelerinde borik asit ve nanoteknolojik vernik ile emprenye edilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek retensiyon değeri 40 dakika vakum ve 60 dakika difüzyonda (%8,35), en düşük ise 20 dakika vakum ve 60 dakika difüzyonda (%3,10) elde edilmiştir. Ayrıca, 20 dakika vakum–60 dakika difüzyon süresinde en yüksek eğilme direnci (89,68 N/mm²) ve nanoteknolojik vernik uygulamasında en yüksek elastikiyet modülü (10 300 N/mm²) belirlenmiştir. Bulgular, nanoteknolojik verniklerin ahşabın mekanik performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Papadopoulos vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada, ahşabın kimyasal modifikasyonu alanındaki gelişmeler, özellikle asetillenmiş ve furfurillenmiş ahşap üzerine yapılan ve endüstriyel ölçekte uygulanabilen araştırmalar özetlenmiştir. Ayrıca, nanoteknolojinin ahşap koruma alanında sunduğu yenilikçi ve çevre dostu çözümler ele alınmıştır. Nanomalzemelerin kullanımıyla ahşabın boyutsal kararlılığı artırılmakta, nem değişimlerine ve biyolojik bozunmaya karşı dayanımı geliştirilmektedir. Ahşap hücre duvarının moleküler ölçekte gözenekli yapısı, nano boyuttaki parçacıkların derinlemesine nüfuz etmesine olanak tanır. Bu sayede, yüzey kimyası değişen ahşap daha dayanıklı ve yüksek performanslı bir malzeme haline gelmektedir.

Papadopoulos ve Taghiyari (2019), yapmış oldukları çalışmada, nanoteknoloji kullanılarak ahşap yüzey özelliklerinin geliştirilmesini incelemektedir. Ahşabın gözenekli hücre yapısı, nano malzemelerin yüzeye derinlemesine nüfuz etmesini sağlayarak dayanıklılık, su iticilik, UV ve yangın direnci gibi özellikleri artırır. Nano-silika, ZnO, MgO ve gümüş nanoparçacıklar; ahşabın mekanik dayanımını, boyutsal kararlılığını ve biyolojik direncini artırmakta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüzey kaplamaları veya vernik sistemlerine eklenerek hidrofobik ve uzun ömürlü yüzeyler elde edilmesini sağlar. Nanoteknolojik uygulamalar, ahşap ürünlerin performansını ve sürdürülebilirliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak çevresel ve sağlık etkilerinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi gelecekteki kullanımlar açısından önem taşımaktadır.

Hernandez vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada, ahşap yüzeylerin UV radyasyonuna karşı korunmasında titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerinin fotokatalitik aktivitesinin rolünü incelemektedir. Tetraetil ortosilikat (TEOS) ile modifiye edilerek silika tabakasıyla kaplanan TiO_2 nanopartiküllerinin ($\text{TiO}_2\text{-Si}$) fotokatalitik aktiviteleri bastırılmış, bu değişimin serbest radikal üretimi ve renk değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Radiata çamı yüzeyleri, TiO_2 ve $\text{TiO}_2\text{-Si}$ nanopartikülleriyle kaplanarak 2000 saat UV ışığına maruz bırakılmıştır. Renk değişimi (CIE Lab*), FTIR-ATR ve SEM analizleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, modifiye edilmiş nanopartiküllerin radikal üretimini azalttığını ancak fotoaktif TiO_2 'nin renk değişimini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir. Çalışma, TiO_2 'nin fotokatalitik aktivitesinin lignin fotooksidasyonunu engelleyerek ahşap yüzeylerin UV dayanıklılığını artırdığını ortaya koymaktadır. Fotokatalitik aktivitenin tamamen bastırılmasının koruma performansını düşürebileceği vurgulanmıştır.

Pacheco Pinilla vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada, ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak kabul edilmesine rağmen, biyotik ve abiyotik etmenlere karşı hassasiyetleri nedeniyle koruyucu kaplamalarla desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada, yaban mersini budama artıklarından elde edilen nanoselülozun titanyum dioksit (TiO_2) ve silika dioksit (SiO_2) nanopartikülleriyle birlikte su bazlı verniklere eklenmesinin ahşap yüzeylerin mekanik

performansını ve boyutsal stabilitesini artırdığı, özellikle yapışma ve aşınma direncinde iyileşmeler sağladığı, buna karşın kaplamanın optik şeffaflığı, renk ve parlaklık özelliklerinde anlamlı bir değişim oluşturmadığı belirlenmiştir.

Svora vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada, TiO₂ kaplamalarının kayın ve çam ahşap üzerindeki UV koruma potansiyelini ve hücre duvarı ile etkileşimlerini incelemiştir. Kullanılan TiO₂ parçacıkları amorf ve fotokatalitik olmayıp, kaplama homojen bir tabaka oluşturmamış ve ahşap yapısına nüfuz ederek mikroyapısal deformasyonlara (çatlaklar, bükülme, delikler) yol açmıştır. FTIR-ATR analizleri UV ışıının lignin depolimerizasyonu ve selüloz kristalliliğinde bozulmalara neden olduğunu göstermiştir. Akrilik reçine kaplamanın tutunmayı ve UV korumayı bir miktar artırdığı, su camı bağlayıcının ise yapıyı karmaşıktırdığı gözlemlenmiştir. Hızlandırılmış yaşlandırma testleri ve TEM incelemeleri, TiO₂ kaplamasının sınırlı UV koruması sağladığını ve uzun vadede mikro çatlakların ahşap bileşenlerinin bozulmasını engelleyemediğini ortaya koymuştur. Kayın ahşap, çama kıyasla daha iyi korunmuştur. Çalışma, TiO₂ kaplamalarının ahşap yüzey koruma teknolojilerinde potansiyelini ve sınırlılıklarını göstermektedir.

Liu vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada, su bazlı silikon modifiyeli poliüretan (RF-608) ve silika nanoparçacıkları kullanılarak çevre dostu süperhidrofobik vernik kaplamalar geliştirilmiştir. Flor ve toksik çözücüler içermeyen bu kaplamalarda, farklı silika oranlarının hidrofobisite, çizilme direnci ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre, %30 silika içeren kaplamalar en yüksek süperhidrofobiklik (su iticilik) ve mekanik dayanım göstermiştir. Ayrıca bu kaplamalar yağ-su ayırma ve buzlanma önleme testlerinde üstün performans sergilemiştir. Elde edilen çevre dostu vernik kaplamaların, kendi kendini temizleyen, buzlanmayı önleyen ve su/yağ ayırıcı yüzey uygulamaları için uygun olduğu belirlenmiştir.

Atılğan ve Sofuoğlu (2023), yapmış oldukları çalışmada, çam, Anadolu kestanesi ve doğu kayını örnekleri üzerine farklı vernikler uygulanarak yüzey pürüzlülüğü ve parlaklık değişimleri incelenmiştir. Numuneler 50 °C’de kurutulup oda ve -20 °C koşullarında kondisyonlandırılarak 15 döngüye tabi tutulmuştur. Sonuçlar, tüm vernikli örneklerde

soğuk test sonrası parlaklıkta azalma, Rz değerlerinde artış, Ra değerlerinde ise çam ve kestanede artış, kayında azalma olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, ahşap malzemelerin değişken çevre koşullarındaki kullanılabilirliğini ve yüzey işlemlerinin performansını değerlendirmek için önemli bilgiler sunmaktadır.

Atılğan ve Sofuoğlu (2023a), yapmış oldukları çalışmada, sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), Anadolu kestanesi (*Castanea sativa* Mill.) ve doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) örnekleri üzerine selülozik, su bazlı ve parlak yüzey vernikleri uygulanarak sıcak-soğuk çevrim testleri sonrası yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz) ve parlaklık değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Deneyler sonucunda, tüm örneklerde parlaklık değerlerinin azaldığı, Rz pürüzlülük değerlerinin arttığı, Ra değerlerinin ise çam ve kestanede arttığı, kayında azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, farklı iklim koşullarına maruz kalan ahşap yüzeylerin performansını değerlendirmede vernik türü ve yüzey özelliklerinin önemli olduğunu göstermektedir.

Rahayu vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada, acacia mangium odununun dayanıklılığını artırmak amacıyla TiO₂ nanoparçacıkları ile modifiye edilmiş yağ ve su bazlı vernikler uygulanmıştır. Kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğü azalmış, hidrofobik özellik artmış ve renk değişimleri yavaşlamıştır. En etkili vernik formülleri V1-CT10 ve V2-CT10 olarak belirlenmiş ve fotokataliz testlerinde sırasıyla %75,21 ve %71,03 metilen mavisi bozunumu sağlanmıştır. FTIR analizleri, nanokaplama vernik uygulaması ile odunun yapısal fonksiyonel gruplarında belirgin bozulma olmadığını göstermiştir.

Atılğan vd. (2024), yapmış oldukları çalışmada, ahşap malzemelerin mekanik yoğunlaştırma işleminin vernik yüzey yapışma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karaçam (*Pinus nigra*) ve uludağ köknarı (*Abies bornmuelleriana*) örnekleri, radyal yönde %25 ve %50 oranında yoğunlaştırılmıştır. Sonuçlar, densifikasyonun siyah çamda yüzey yapışma direncini artırırken, köknarda azalttığını göstermiştir. En yüksek yapışma direnci siyah çam + zımparasız yüzey + %25 yoğunlaştırmada, en düşük ise Uludağ köknarı + zımparasız yüzey + %50 yoğunlaştırmada gözlenmiştir. Bulgular, özellikle siyah çamda poliüretan vernik için densifikasyonun yapışmayı artırdığını ve zımparanın

bu değerleri daha da glendirdiğini, dolayısıyla vernikli ürünlerin çoğu zaman zımparaya ihtiyaç duymadığını ortaya koymaktadır.

Miklei vd. (2024), yapmış oldukları çalışmada, modifiye edilmiş ve edilmemiş titanyum dioksit (TiO_2) nanopartikülleri içeren poliakrilat su bazlı kaplamaların, işlenmemiş ve $190\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ThermoWood yöntemiyle ısıı işlem görmüş dişbudak ağacının hava koşullarına karşı dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Numuneler 360 saat boyunca UV işığı, su ve nem altında test edilmiştir. Bunun sonucunda nano- TiO_2 'nin işlenmemiş ahşapta renk ve parlaklık stabilitesini artırdığını; ancak ısıı işlem görmüş ahşapta ek bir iyileştirme sağlamadığını göstermiştir. AIBA modifikasyonu, renk stabilitesini artırırsa da yüzeyde sütlü bir görünüm oluşturmuştur. Kaplama yüzeylerinde çatlak gözlenmemiş, ancak film kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Çalışma, nano- TiO_2 'nin fotostabilizasyon açısından umut verici olduğunu, ancak modifikasyon yöntemlerinin özellikle ısıı işlem görmüş ahşaplarda optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Ulay vd. (2025), yapmış oldukları çalışmada, yapay yaşlandırmanın poliüretan modifiyeli su bazlı vernik uygulanmış dişbudak odununun parlaklık ve renk özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşlem görmemiş örneklerde yaşlandırma sonrasında L^* değerlerinde azalma, h° , C^* , b^* ve parlaklıkta artış gözlenmiştir. $190\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1,5 saat ısıı işlem uygulanmış örneklerde L^* , b^* , h° ve parlaklık artarken, a^* ve C^* değerleri azalmıştır. $212\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat işlem gören örneklerde ise a^* , L^* , h° , b^* ve C^* artmasına rağmen parlaklık dşmştir.

Kalinowski vd. (2025), yapmış oldukları çalışmada, düşük yoğunluklu UV-A ışınımının ($1\text{--}10\text{ W/m}^2$) nano- TiO_2 içeren akrilik esaslı fotokatalitik kaplamaların yapısal bütünlüğü ve hava temizleme performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. P25 ve karbon katkılı K7000 tipi TiO_2 nanopartikülleri içeren kaplamalar test edilmiştir. Düşük ışınım koşullarında dahi bağlayıcı bozunmasının meydana geldiğini, yüzey gözenekliliğinin %2,28'den %9,09'a yükseldiğini ve NO giderme verimliliğinin arttığını göstermiştir. Ancak bu süreçte benzen emisyonları ($\sim 5\text{ ppb}$) ve potansiyel nano- TiO_2 salınımı gibi

ikincil kirlilik sorunları gözlemlenmiştir. UV-A ışınımı, kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturarak malzemenin uzun vadeli kararlılığını azaltmıştır.

Atılğan ve Evcin (2025), yapmış oldukları çalışmada, ahşap yüzeylerin dayanıklılığını, estetik özelliklerini ve kullanım ömrünü artırmak amacıyla nanoteknoloji temelli yüzey modifikasyonları uygulanmıştır. Bu kapsamda üç farklı nano kaplama çözeltisi (AS-54, HL-31 ve SH-5) hazırlanarak sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) ve sedir (*Cedrus libani* A. Rich.) odun türlerine uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, SH-5 nano çözeltisinin doğu kayını örneklerinde 103,51° temas açısı ile en yüksek hidrofobik ve leke tutmaz yüzey özelliklerini sağladığı belirlenmiştir. Çalışma, nanomalzemelerin ahşap yüzeylerin korunması, su itici özelliklerinin geliştirilmesi ve hijyen koşullarının iyileştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Ağaç Malzeme

Bu araştırmada, farklı özgül ağırlıkları temsil etmesi ve kullanım alanlarına göre mekanik dayanımlarının farklılık göstermesi nedeniyle yerli, düşük yoğunluklu kızılçam (*Pinus brutia*) ve ithal, yüksek yoğunluklu iroko (*Chlorophora excelsa*) odunları deney materyali olarak tercih edilmiştir. Deney örnekleri Hatay ili İskenderun ilçesi kereste firmalarından rastgele seçim yöntemi ile temin edilmiştir.

3.1.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Deneylerde iki farklı üst yüzey kaplama maddesi kullanılmıştır:

- Akrilik vernik,
- Şeffaf dökme tip epoksi reçine.

Her iki sistemde de nano katkı maddesi olarak Titanyum dioksit (TiO_2) ve Silisyum dioksit (SiO_2) tercih edilmiştir. Katkı oranları, literatürde önerilen sınırlar dikkate alınarak %1 ve %2 olarak belirlenmiştir. Kontrol gruplarında ise nano katkı maddesi kullanılmamıştır.

Nano Parçacıklar: Bu çalışmada kaplama malzemelerinin yüzey performansını artırmak amacıyla titanyum dioksit (TiO_2) ve silika (SiO_2) nanoparçacıkları kullanılmıştır. TiO_2 , yüksek refraktif indeks ve UV ışınlarına karşı dayanıklılığı ile bilinirken, SiO_2 , kaplama yüzeyinde mekanik dayanımı artırarak aşınma ve çizilmeye karşı koruma sağlamaktadır. Her iki nanoparçacık da homojen bir şekilde reçine ve vernik matrisine dağıtılmıştır.

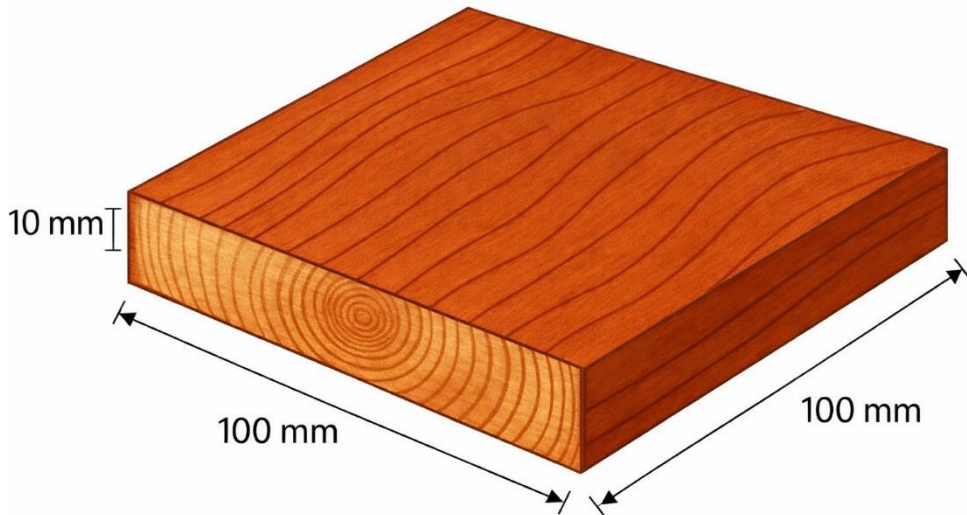
Vernikler: Kaplamaların hazırlanmasında iki farklı üst yüzey işlem maddesi kullanılmıştır: Çift komponentli (sertleştiricili) epoksi reçine (2K): Epoksi reçine ve sertleştirici içeren bu sistem, yüksek kimyasal ve mekanik dayanım sağlar. Odun yüzeyine güçlü yapışma ve dayanıklı bir kaplama oluşturur. Akrilik esaslı çift

komponentli vernik (2K): Akrilik reçine ve sertleştiriciden oluşan bu vernik, şeffaflık ve UV dayanımı açısından avantajlıdır. Hızlı kürlenme ve yüzey esnekliği ile kullanım kolaylığı sunar. Her iki vernik sistemi de nanoparçacıklarla birlikte uygulanarak yüzey dayanımı ve uzun ömürlülük artırılmıştır.

3.2. Metot

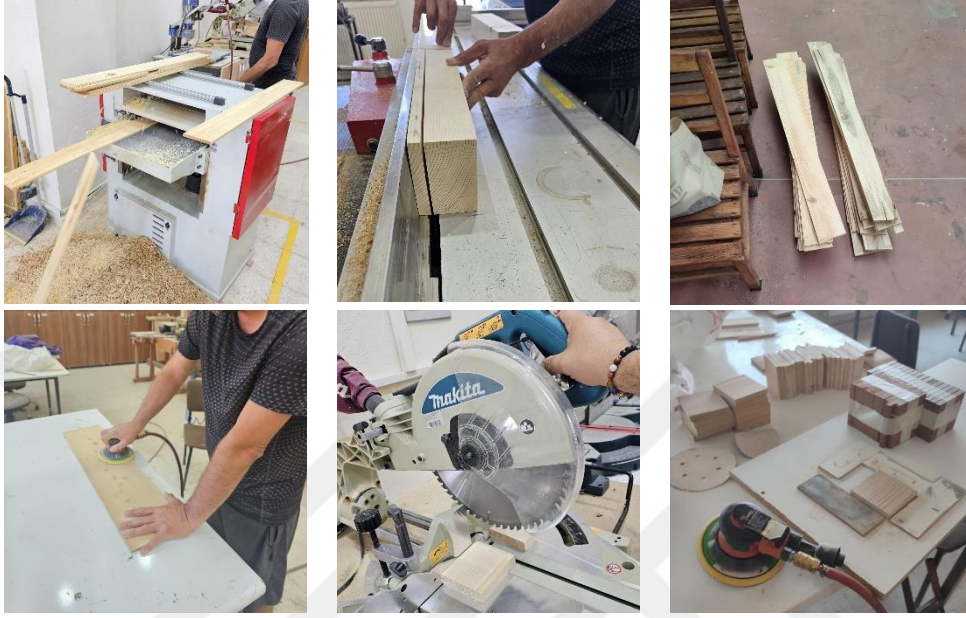
3.2.1. Deney Örneklerinin Hazırlanması

Deney örnekleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Mobilya ve Dekorasyon Atölyesi'nde TS 3129 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir test için 10 tane olmak üzere toplamda 200 adet deney örneği çalışmada kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Kızılçam ve İroko odunları lif yönü yüzeye paralel olacak şekilde 100×100×10 mm boyutlarında kesilmiştir (Şekil 3.1). Kesim işlemlerinin ardından örnek yüzeyleri düzgün bir yüzey elde etmek amacıyla sırasıyla P80, P120, P180, P220 numaralı zımparalarla kademeli olarak titreşimli zımpara makinesi ile zımparalanmıştır. Yüzey işlemleri sonrasında, örnekler yüzeydeki talaş ve toz kalıntılarından arındırılmış, ardından 12 ± 1 oranında denge rutubetine ulaşınca kadar $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve 65 ± 5 bağıl nem koşullarında etüvde klimatize edilmiştir.



Şekil 3.1. Deney Örneği

Deney örneklerinin üretim süreci Resim 3.1’de gösterilmiştir. Örnekler, belirlenen ebatlara ulaşıncaya kadar sırasıyla şerit testere, planya, kalınlık, daire testere, gönye kesme (baş kesme) ve zımpara makinelerinde işlem görmüştür.



Resim 3.1. Deney örneklerinin hazırlanması

3.2.2. Vernik Karışımlarının Hazırlanması

Bu çalışmada, nano boyutlu titanyum dioksit (TiO_2) ve silisyum dioksit (SiO_2) tozları, çift komponentli vernik ve epoksi reçine esaslı kaplama sistemlerine belirlenen oranlarda (%1 ve %2, ağırlık/hacimce) ilave edilmiştir. Vernik sistemleri, ASTM D 3023 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Nano katkıların vernik matrisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla, yüksek hızlı dispersiyon ve homojenizasyon kapasitesine sahip paslanmaz çelik bıçak uçlu bir dispersiyon cihazı kullanılmıştır (Resim 3.2). Bu cihaz, nano parçacıkların bir araya gelmesini (aglomere olmasını) önlemek ve yüzey gerilimini azaltmak ve tozların topaklanmasını önlemek için kullanılmıştır.

Karıştırma işlemi, vorteks oluşumu gözlemlenene kadar 4000 devir/dakika hızda sürdürülmüş; vorteks oluşuktan sonra karışımın tam homojenleşmesi için 15 dakika daha devam ettirilmiştir. Ayrıca, aşırı ısınmayı önlemek amacıyla cihaz belirli aralıklarla durdurulmuş ve işlem süresince ortam sıcaklığı 23 ± 2 °C seviyesinde tutulmuştur.

Uygulama 6ncesinde, nano katkılı vernik karışımları oda sıcaklığında bir süre bekletilmiştir.



Resim 3.2. Deneylerde kullanılan dispersiyon cihazı

Bu yöntemin temel amacı, nano TiO_2 ve SiO_2 partiküllerinin vernik matrisinde homojen biçimde dağılmasını sağlamak, aglomerasyonu azaltmak ve kaplama performansını artırmaktır. Kontrol grubu örneklerinde ise yalnızca saf (nano katkısız) vernik ve reçine kullanılmıştır. Verniğin hazırlanma ve nano katkı maddelerinin katılması süreci Resim 3.3’de gösterilmiştir.

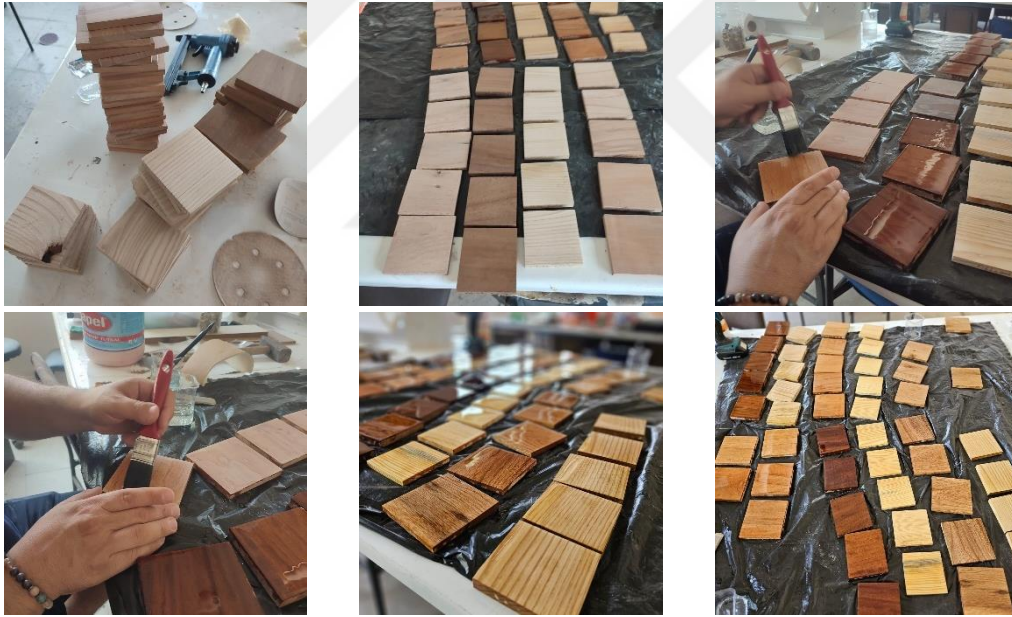


Resim 3.3. Vernik karışımlarının hazırlanması

3.2.3. Vernik Uygulaması

Vernik uygulamaları, ASTM D 3023 esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Her bir örneğin yüzeyi, uygulama öncesinde kuru ve tozsuz hale getirilmiştir. Vernikler, fırça ile üç kat halinde uygulanmıştır. Katlar arası kuruma süresi 48 saat olup, her kat arasında yüzey pürüzsüzlüğünü sağlamak amacıyla P400 numara zımpara uygulanmıştır. Son katın uygulanmasının ardından örnekler, 7 gün boyunca $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarında kürlenmeye bırakılmıştır. Her bir kombinasyon (ağaç türü $\times$ vernik türü $\times$ nano katkı türü $\times$ katkı oranı) için 10 tekrür hazırlanmıştır. Toplamda 200 adet deney örneği elde edilmiştir.

Deney örneklerine vernik uygulama işlemleri Resim 3.4’de gösterilmiştir



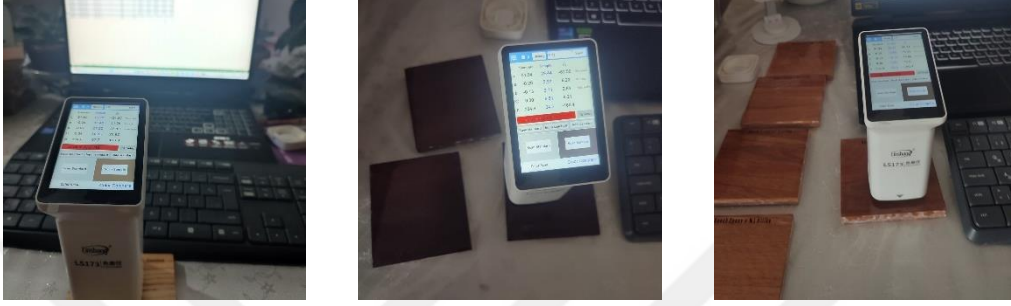
Resim 3.4. Farklı ağaç türlerine ve nano katkı oranlarına göre vernik uygulama

3.2.4. Ölçümler

Tüm fiziksel ölçümler, vernikli yüzeylerin kürlenme süresi tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerden önce tüm örnekler $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarında 24 saat süreyle bekletilmiştir.

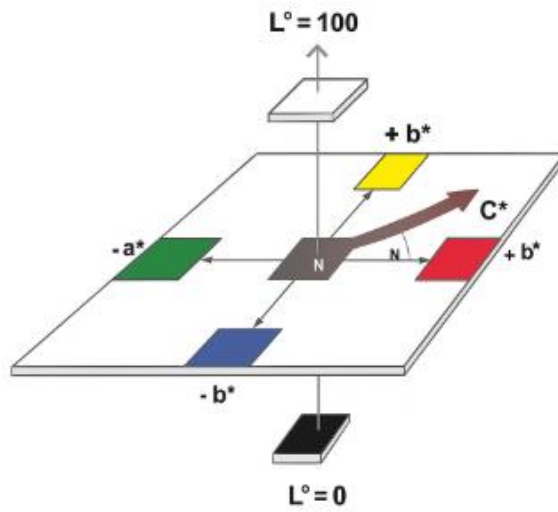
3.2.4.1. Renk Ölçümü

Renk ölçümleri, ASTM D 2244 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, CIE $L^*a^*b^*$ renk sistemine göre yapılmıştır. Linshang LS173 marka/model renk ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Resim 3.5).



Resim 3.5. Renk ölçüm cihazı

CIE $L^*a^*b^*$ renk sisteminde; L^* değeri siyah-beyaz eksenini temsil eder ($L^*=0$ siyahı, $L^*=100$ ise beyazı ifade eder). a^* eksenini kırmızı-yeşil doğrultusunda olup, pozitif değerler kırmızıyı, negatif değerler yeşili gösterir. b^* eksenini ise sarı-mavi doğrultusundadır; pozitif değerler sarıyı, negatif değerler maviyi belirtir. CIE $L^*a^*b^*$ renk uzayının şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir. Ölçümlerde kullanılan cihaz, D65 ışık kaynağı ve 10° gözlem açısı temel alınarak kalibre edilmiştir (Karamanoğlu, 2020).



Şekil 3.2. CIE $L^*a^*b^*$ renk alanı

CIEL*a*b* sistemine göre renk farklılığı (ΔE^*), aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanır:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

eşitliğinden yararlanılarak belirlenir (ASTM-D 2224-2 e1, 2003).

Burada L_0^* , a_0^* , b_0^* kontrol grubu değerlerini ifade etmektedir. Değişim kontrol grubuna göre değerlendirilmiştir.

3.2.4.2. Parlaklık Ölçümü

Verniklenmiş deney numunelerinin parlaklık ölçümleri, ASTM D 523 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Parlaklık ölçümleri, yüzeylerin ışığı yansıtma yeteneğinden yararlanılarak 60° açılı Kompakt Konica Minolta Gloss-metre (parlaklık ölçer) cihazı ile yapılmıştır (Resim 3.7). Cihaz, bir ışık kaynağı, deney parçasına belirli açılarda yönlendirilen ışık demetini sağlayan optik sistem, yansıyan ışığı algılayan fotosel ve ölçüm göstergesinden oluşmaktadır.

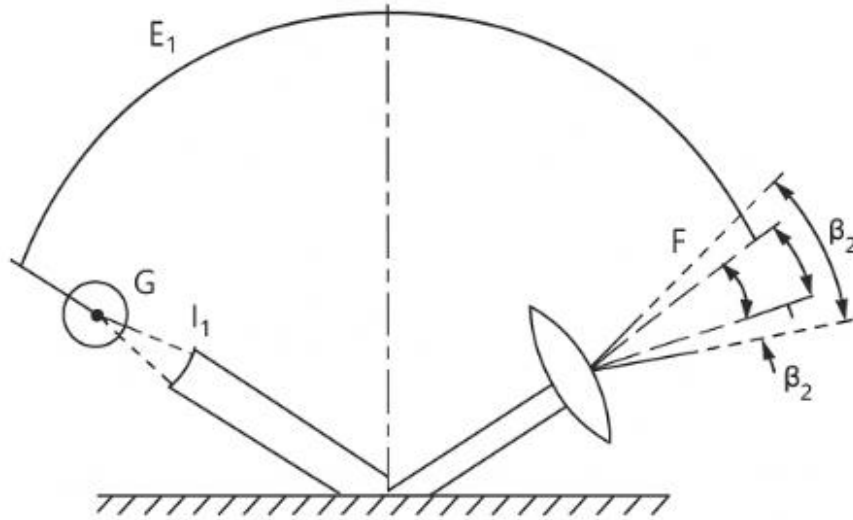


Resim 3.6. Gloss-metre (parlaklık ölçer)

Boya ve vernik katmanlarının parlaklık ölçümü 20°, 60° ve 85° olmak üzere üç farklı açıda yapılabilmektedir:

- 60°’de hem parlak hem de mat yüzeylerde,
- 20°’de, 60°’deki parlaklık değeri 70 birimden fazla olan çok parlak yüzeylerin ayırımında,
- 85°’de, 60°’deki parlaklık değeri 10 birimden az olan mat yüzeylerin ayırımında kullanılmaktadır (Ünal, 2016).

Bu çalışmada, ölçümler $60^\circ \pm 2^\circ$ açıda ölçüm yapan dijital parlaklık ölçer cihazı ile yapılmıştır. Her bir deney örneğinde 5 farklı noktadan ölçüm alınmış, elde edilen değerlerin ortalaması Gloss Unit (GU) cinsinden hesaplanmıştır. Ölçüm öncesinde tüm yüzeylerin temizliğine dikkat edilmiş ve cihaz her ölçümden önce kalibre edilmiştir. Parlaklık ölçüm cihazının kesit görünümü Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Gloss-metrenin ölçüm prensibi (Ünal, 2016)

Cihazda yer alan ışık kaynağı (G) belirli bir dalga boyuna sahip ışığı üretir ve bu ışık, mercekler (L_1 ve L_2) yardımıyla yönlendirilir. Yansıyan ışık, alıcı açıklığı ($\delta_B = 4,4 \pm 0,1^\circ$) aralığında bulunan alıcı pencereye (B) ulaşır. Ölçüm sırasında, ışık demeti yüzeye $E_1 = E_2 = 60^\circ \pm 2^\circ$ açıyla gönderilir. Yüzeyden yansıyan ışığın oluşturduğu kaynak görüntü açısı ($\delta_2 = 0,75 \pm 0,25^\circ$) ve filament görüntüsü (I), alıcı tarafından algılanarak parlaklık değeri belirlenir. Bu değer, P ile gösterilen boya filmi veya kaplama yüzeyinin yansımaya karakteristiğini ortaya koyar (Şekil 3.3).

3.2.4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Ahşap yüzeylerde kaplama sonrası oluşan mikro-geometrik değişimlerin belirlenebilmesi amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, TS 2495 EN ISO 3274 ve TS 6212 EN ISO 4288 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

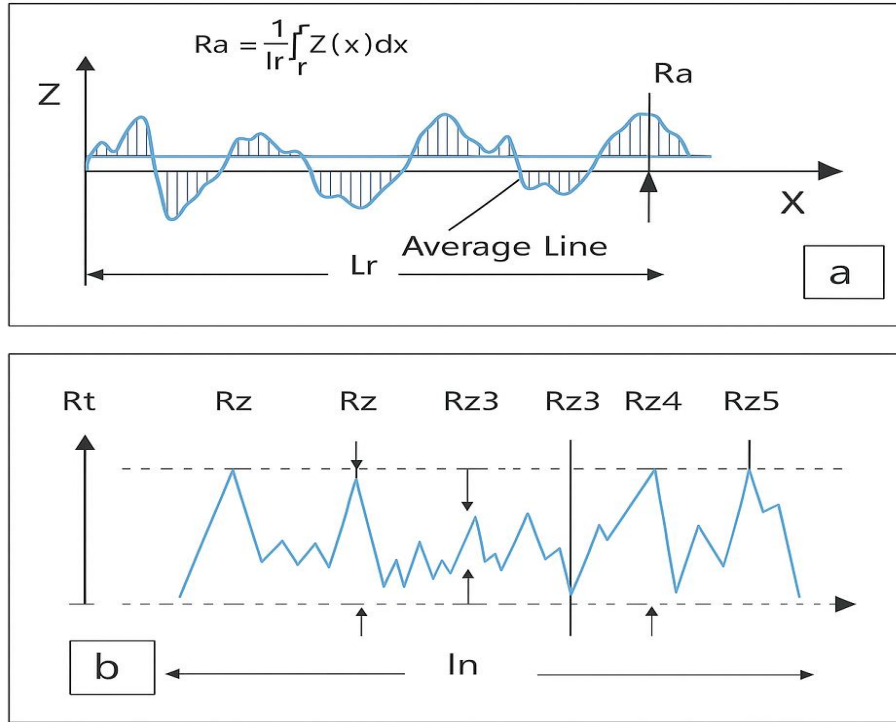
Deneyisel ölçümler TIME TR-200 (3200) marka iğne taramalı yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Resim 3.7). Ölçüm işlemleri, yüzey dokusunun gerçek pürüzlülük karakteristiğini yansıtabilmesi için lif yönüne dik doğrultuda uygulanmıştır. Her bir deney örneğinden beş farklı noktadan ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması değerlendirmeye alınmıştır.



Resim 3.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Cihaz ayarlarında ölçüm uzunluğu (Lt) 4 mm, kesme uzunluğu (cut-off, λ_c) ise 0,8 mm olarak belirlenmiştir. Pürüzlülük parametrelerinden ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve on nokta ortalama yüzey pürüzlülüğü (Rz) değerleri kaydedilmiştir.

Ra değeri, pürüzlülük profili boyunca profil ortalama çizgisinden sapmaların aritmetik ortalamasını ifade ederken; Rz değeri, ölçüm uzunluğu boyunca yer alan en yüksek beş tepe ile en derin beş çukurun ortalama yükseklik farklarının toplamını göstermektedir (Karamanoğlu, 2020) (Şekil 3.4).



Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Rz: on nokta ortalama yüzey pürüzlülüğü, Rt: Toplam profil yüksekliği ln: ölçüm uzunluğu, Lr: örnek uzunluğu

Şekil 3.4. Ortalama (Ra) ve on nokta ortalama (Rz) yüzey pürüzlülüğü (Karamanoğlu, 2020)
Elde edilen Ra ve Rz değerleri, kaplama sistemlerinin ahşap yüzey dokusu üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

3.3. Veri Değerlendirme

Çalışmada elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirilmesinde SPSS paket programı kullanılmıştır. İstatistiksel analizlerde, farklı ağaç türleri üzerine uygulanan verniklerin yüzey özellikleri karşılaştırılmıştır. Vernik uygulamaları sonrasında yapılan ölçümler sonucunda; ağaç türü, vernik türü ve yüzey parametreleri (renk, parlaklık, pürüzlülük) arasındaki ilişkiler Çoklu Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre ağaç türü, vernik tipi ve bunların karşılıklı etkileşimlerinin renk değişimi, parlaklık ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Faktör etkileşimlerinin $\alpha=0,05$ önem düzeyinde anlamlı olduğu durumlarda, gruplar arasındaki farkın hangi değişkenden kaynaklandığını belirlemek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Renk Ölçümü

Bu bölüm, yüzey kaplama malzemelerine eklenen TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin kaplama renk parametreleri (L^* , a^* , b^* , C^* , h°) üzerindeki etkisini inceleyen çalışmanın varyans analizi (ANOVA) ve çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına dayalı nicel verilerini sunmaktadır. Çizelge 4.3'ten Çizelge 4.'e kadar verilen veriler, analiz sonuçlarının istatistiksel geçerliliğini ortaya koyarken, deneysel işlemler arasındaki farklılıkların büyüklüğünü de belirlemektedir. Renk parametreleri, kaplamanın optik bütünlüğünü ve görsel stabilitesini değerlendirmede önemli göstergeler olup, örneklerin renk değerlerinin korunması kaplama yüzeyinin başlangıçtaki estetik görünümünü muhafaza ettiğini ve yüksek renk stabilitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, a^* , b^* , C^* ve h° parametreleri dikkate alınarak kaplama filmlerinin renk özellikleri incelenmiş, nanoparçacık katkısının kaplamanın renk bütünlüğü üzerindeki etkileri nicel olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. L^* parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	49690.966	1	49690.966	14803.646	0.000*
Vernik Türü (B)	459.136	1	459.136	136.783	0.000*
Etkileşim (AB)	25.141	1	25.141	7.490	0.007*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	17486.914	4	4371.728	1302.400	0.000*
Etkileşim (AC)	7438.666	4	1859.666	554.021	0.000*
Etkileşim (BC)	558.029	4	139.507	41.561	0.000*
Etkileşim (ABC)	204.116	4	51.029	15.202	0.000*
Hata	604.201	180	3.357		
Toplam	795748.548	200			
Düzeltilmiş Toplam	76467.169	199			

Çizelge 4.1'de sunulan varyans analizi sonuçlarına göre, L^* (açıklık) değeri üzerinde ağaç türü, vernik türü ve nano katkı oranı faktörlerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahiptir ($p < 0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de L^* değerinde anlamlı farklılıklar oluşturmuştur. Bu bulgular, yüzeyin renk açıklığının yalnızca tek bir değişkene bağlı olmadığını; ağaç türü, kullanılan vernik sistemi ve nano

katkı oranının birlikte etkisiyle değiştiğini göstermektedir. Yüksek $L^*L^*L^*$ değerleri daha açık ve parlak yüzeyleri, düşük L^* değerleri ise daha koyu görünümleri ifade etmektedir.

Kızılçam örneklerinde L^* değerleri, vernik tipi ve nano katkı maddesine bağlı olarak değişmiştir. Akrilik vernikte kontrol grubunun 78.76 olan L^* değeri, %1 TiO_2 katkısında 74.54'e düşerken %2 katkıda 85.31'e yükselmiştir. Bu durum, yüksek TiO_2 oranının yüzey parlaklığını artırdığını göstermektedir. SiO_2 katkısı ise yüzeyi koyulaştırmış; %1 ve %2 oranlarında sırasıyla 77.76 ve 71.65 değerleri elde edilmiştir. Epoksi vernikte de benzer eğilim görülmüş, TiO_2 katkısı L^* değerini artırırken (76.39 ve 80.05), SiO_2 katkısı düşürmüştür (72.03 ve 65.77). Genel olarak TiO_2 katkısı, özellikle %2 oranında kullanıldığında yüzeyin daha açık ve parlak görünmesini sağlamış, SiO_2 katkısı ise koyulaştırıcı bir etki göstermiştir (Çizelge 4.2).

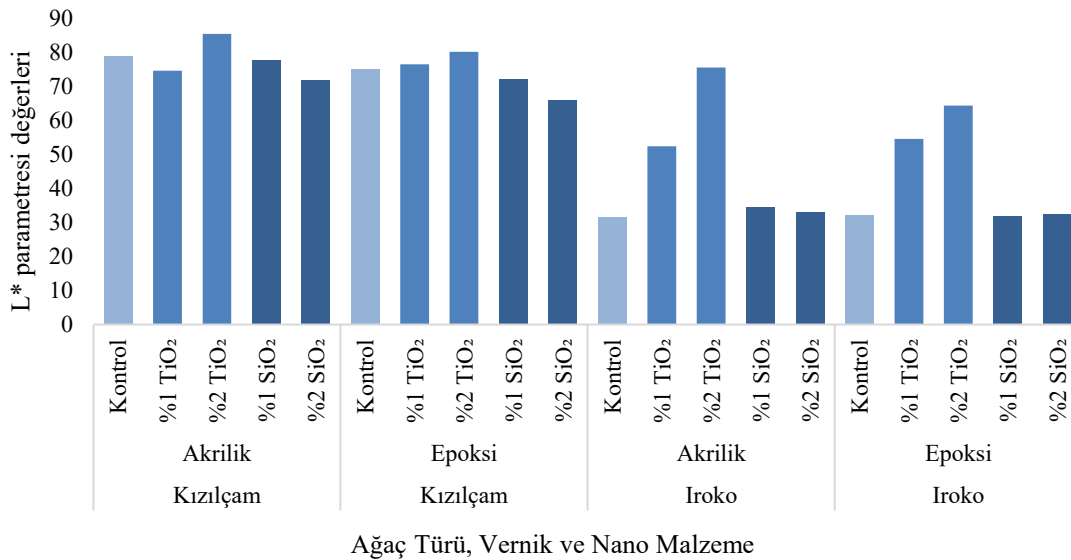
Çizelge 4.2. L^* parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	78.76	-	BC	1.15	77.10	80.33	1.472
			1	74.54	↓5.36	F	1.66	72.30	76.24	2.211
			2	85.31	↑8.32	A*	1.47	83.13	88.38	2.722
		TiO_2	1	77.76	↓1.27	CD	1.78	75.60	81.46	2.955
			2	71.65	↓9.03	G	3.89	61.85	74.71	4.33
		SiO_2	1							
			2							

Epoksi Reçine	Kontrol	0	75.08	-	EF	1.49	72.54	78.40	1 9 8 2
		1	76.39	↑1.74	DE	1.72	72.19	78.18	2 2 5 3
		2	80.05	↑6.62	B	2.91	75.34	83.96	6 4 2
	TiO ₂	1	72.03	↓4.06	G	1.96	69.34	75.48	7 2 3
		2	65.77	↓12.40	H	2.34	62.56	68.91	5 6
	SiO ₂	1	31.64	-	L**	0.87	30.06	32.48	2 7 4 4
		2	52.34	↑65.42	J	2.42	48.45	57.29	6 3 1
	Akrilik	1	75.41	↑138.34	EF	1.03	73.65	76.91	3 6 5
		2	34.52	↑9.10	K	1.85	31.59	37.22	3 7 3
	SiO ₂	1	32.93	↑4.08	KL	1.28	30.60	35.10	8 9
Iroko	Kontrol	0	32.28	-	L	1.09	30.66	34.27	3 3 7 1
		1	54.48	↑68.77	I	0.97	53.58	56.04	7 9 2
		2	64.26	↑99.07	H	1.73	62.94	67.38	6 9 3
	TiO ₂	1	31.73	↓1.70	L	1.04	29.83	32.78	2 6 2
		2	32.49	↑0.65	L	0.84	31.26	33.61	2 .
	SiO ₂	1	31.73	↓1.70	L	1.04	29.83	32.78	2 6 2
		2	32.49	↑0.65	L	0.84	31.26	33.61	2 .
	Epoksi Reçine	1	31.73	↓1.70	L	1.04	29.83	32.78	2 6 2
		2	32.49	↑0.65	L	0.84	31.26	33.61	2 .
	SiO ₂	1	31.73	↓1.70	L	1.04	29.83	32.78	2 6 2
		2	32.49	↑0.65	L	0.84	31.26	33.61	2 .

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç

İroko örneklerinde L^* değerleri, düşük parlaklığa sahip kontrol grubunda akrilik vernikte 31.64, epoksi vernikte ise 32.28 olarak ölçülmüştür. TiO_2 katkısı bu değerleri belirgin biçimde yükseltmiş; akrilik vernikte %1 oranında 52.34'e, %2 oranında 75.41'e, epoksi vernikte ise sırasıyla 54.48 ve 64.26'ya çıkarmıştır. Buna karşılık SiO_2 katkısı, her iki vernik sisteminde de L^* değerinde yalnızca sınırlı değişim göstermiş, yüzey açıklığını hafifçe artırmış ya da sabit tutmuştur. Bu sonuçlar, TiO_2 'nin özellikle koyu renkli iroko yüzeylerinde belirgin bir beyazlatıcı etki oluşturduğunu, SiO_2 'nin ise yüzey renginde anlamlı bir değişim sağlamadığını göstermektedir (Çizelge 4.2).



Şekil 4.1. L^* parametresi ortalama değerleri

L^* parametresi sonuçlarına göre hem Kızılçam hem de İroko örneklerinde yüzey açıklığı vernik tipi ve nano katkı türüne bağlı olarak önemli farklılıklar göstermiştir. Kızılçamda TiO_2 katkısı, özellikle %2 oranında uygulandığında L^* değerini belirgin biçimde artırarak yüzeyin daha açık ve parlak görünmesini sağlamıştır. SiO_2 katkısı ise genellikle yüzey renginde koyulaşmaya neden olmuştur. İroko örneklerinde ise TiO_2 katkısı dikkat çekici bir beyazlatma etkisi göstermiş; koyu renkli kontrol grubuna kıyasla L^* değerini hem akrilik hem de epoksi vernik sistemlerinde önemli ölçüde yükseltmiştir. Buna karşın SiO_2

katkısı İroko yüzeylerinde renk açıklığını belirgin biçimde değiştirmemiştir. Genel olarak TiO₂ katkısının her iki ağaç türünde de yüzey parlaklığını artırdığı, SiO₂'nin ise bu etkiyi göstermediği belirlenmiştir (Şekil 4.1).

Varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türü, kimyasal katkı ve vernik çeşidi faktörleri L* (açıklık) değeri üzerinde anlamlı etki göstermiştir ($p \leq 0.05$). En yüksek L* değeri %3 TiO₂ katkılı örneklerde (92.97), en düşük değer ise %1 SiO₂ katkılı örneklerde (67.84) elde edilmiştir. TiO₂ katkısı yüzeyin açıklığını artırarak parlak görünüm sağlarken, SiO₂ katkısı koyulaştırıcı etki göstermiştir. Ünal'ın çalışmasında da benzer şekilde, TiO₂'nin özellikle %3 oranında uygulandığında en yüksek L* değerine ulaştığı, SiO₂ katkısının ise renk açıklığını düşürdüğü bildirilmiştir. Her iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, TiO₂'nin yüzeyin optik özelliklerini iyileştirerek daha açık tonlar oluşturduğu, SiO₂'nin ise matlaşmaya ve renk koyulaşmasına yol açtığı görülmektedir. Bu sonuçlar, nanoparçacık katkı oranının kaplama yüzeyinin renk stabilitesi ve estetik görünümü üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.(Ünal, 2016).

Çizelge 4.3'te sunulan varyans analizi sonuçlarına göre, a* değerleri üzerinde ağaç türü, vernik türü ve nano katkı oranı faktörlerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p < 0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de a* parametresinde anlamlı etkiler göstermiştir. Bu sonuçlar, yüzey renginin kırmızı–yeşil ekseninde (pozitif değerler kırmızılığı, negatif değerler yeşilliği ifade eder) meydana gelen değişimlerin, yalnızca ağaç türünden değil, aynı zamanda vernik sistemi ve nano katkı oranının birlikte etkisinden kaynaklandığını göstermektedir.

Çizelge 4.3. a* parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	31.047	1	31.047	36.999	0.000*
Vernik Türü (B)	12.650	1	12.650	15.076	0.000*
Etkileşim (AB)	101.617	1	101.617	121.097	0.000*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	1608.334	4	402.083	479.164	0.000*
Etkileşim (AC)	790.404	4	197.601	235.482	0.000*
Etkileşim (BC)	57.442	4	14.361	17.114	0.000*
Etkileşim (ABC)	109.316	4	27.329	32.568	0.000*
Hata	151.044	180	0.839		
Toplam	13438.543	200			

Kızılçam örneklerinde a^* parametresi (kırmızı-yeşil eksen) vernik tipi ve nano katkı türüne bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermiştir. Akrilik vernikte kontrol grubunun a^* değeri 6.45 iken, %1 TiO_2 katkısı ile bu değer %52.56 artarak 9.84'e yükselmiş; yüzeyin daha kırmızı tonlara kaydığı belirlenmiştir. Ancak TiO_2 oranının %2'ye çıkarılması a^* değerinde %44.81 azalma oluşturmuş ve yüzey renginin yeşilimsi tona yöneldiği gözlenmiştir. SiO_2 katkısı ise Kızılçam yüzeyinde kararsız bir renk değişimi yaratmış; %1 oranında hafif düşüş (%10.08), %2 oranında ise belirgin artış (%22.02) meydana gelmiştir. Epoksi vernikte de benzer eğilimler gözlenmiş, TiO_2 katkısının artışıyla birlikte renk doygunluğunda dalgalanmalar oluşmuştur. Özellikle %2 SiO_2 katkısı, a^* değerini 12.40'a yükselterek kontrol grubuna göre %58.77 artış göstermiş ve en yüksek kırmızılık değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, nano katkıların pigment etkisi yaratarak renk tonunu değiştirdiğini göstermektedir (Çizelge 4.4).

İroko örneklerinde kontrol grubunun a^* değeri akrilik vernikte 10.85, epoksi vernikte 9.33 olarak ölçülmüştür. TiO_2 katkısı her iki vernik türünde de yüzeyin kırmızılığını belirgin biçimde azaltmış; özellikle %2 TiO_2 oranında a^* değeri negatif değerlere inerek (-0.37) yüzeyin yeşilimsi tona dönüştüğünü göstermiştir. Bu durum, TiO_2 'nin yüksek yansıtıcılığı sayesinde koyu renkli İroko yüzeyinde renk açıcı bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır. SiO_2 katkısı ise farklı bir eğilim sergilemiş; akrilik vernikte a^* değerini artırarak kırmızı tonu güçlendirmiş (%12.81 artış), epoksi sistemde ise etkisi daha sınırlı kalmıştır (Çizelge 4.2).

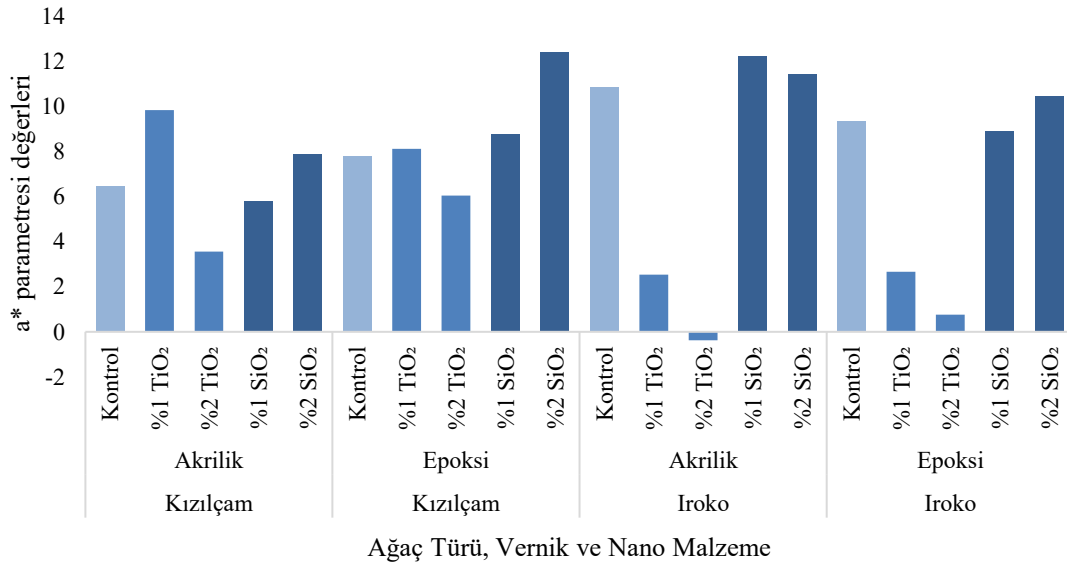
Çizelge 4.4 a^* parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	6.45	-	J	0.64	5.57	7.50	9.84

Epoksi Reçine	TiO ₂	1	9.84	↑52.56	EF	1.13	8.45	12.34	1 1 . 5 2 1 5 6 1 4 . 1 6 1 1 . 5 4 9
		2	3.56	↓44.81	K	0.55	2.92	4.34	2 8
		1	5.80	↓10.08	J	0.82	4.28	6.93	7 8 2 4 . 2 0 1 3 . 5 9 1 0 . 5 3 6
		2	7.87	↑22.02	I	0.91	6.62	9.65	7 8 2 4 . 2 0 1 3 . 5 9 1 0 . 5 3 6
		Kontrol 0	7.81	-	I	0.73	6.06	8.49	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
		1	8.12	↑3.97	HI	0.71	7.08	9.69	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
	TiO ₂	2	6.04	↓22.66	J	1.46	4.12	8.04	7 4 2 5 . 2 0 1 3 . 5 9 1 0 . 5 3 6
		1	8.78	↑12.42	GH	1.19	6.82	10.73	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
	SiO ₂	2	12.40	↑58.77	A*	1.31	10.69	14.22	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
		Kontrol 0	10.85	-	CD	0.73	9.49	11.44	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
	TiO ₂	1	2.53	↓76.68	L	0.64	1.82	3.76	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
		2	-0.37	↓103.41	N**	0.17	-0.58	-0.04	7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3
Iroko	Akrilik								7 4 2 5 . 2 3 - 4 4 . 7 3

Epoksi Reçine	SiO ₂	1	12.24	↑12.81	AB	0.86	11.12	13.45	7 0 5 7	
		2	11.45	↑5.53	BC	0.90	9.37	12.60	8 4	
										1
		Kontrol	0	9.33	-	FG	1.03	8.26	11.44	1 0 5 2 3
	TiO ₂	1	2.66	↓71.49	L	0.62	1.71	3.28	2 1 9 7	
		2	0.76	↓91.85	M	0.74	0.04	1.54	1 0 1 4	
										1
		SiO ₂	1	8.90	↓4.61	GH	1.26	6.85	10.60	1 1 9
	2		10.44	↑11.90	DE	0.95	8.80	11.99	1 0	

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç



Şekil 4.2. a* parametresi ortalama değerleri

a^* parametresi sonuçlarına göre, yüzey rengindeki kırmızı-yeşil yönlü değişimler hem vernik tipi hem de nano katkı türüne bağlı olarak farklılık göstermiştir. Kızılçam örneklerinde TiO_2 katkısı, özellikle %1 oranında uygulandığında a^* değerini artırarak yüzeyin daha kırmızı tonlara yönelmesine neden olmuştur. Ancak katkı oranının %2'ye çıkarılması, değeri düşürerek yüzeyin yeşilimsi bir tona kaymasına yol açmıştır. SiO_2 katkısı ise Kızılçam yüzeylerinde düzensiz bir etki göstermiş; düşük oranda hafif bir azalma, yüksek oranda ise kırmızılıkta artış oluşturmıştır. İroko örneklerinde TiO_2 katkısı, her iki vernik türünde de kırmızılık değerini önemli ölçüde azaltarak yüzeyin renk açıklığını artırmış ve özellikle %2 katkıda yeşilimsi bir görünüm oluşturmıştır. Buna karşılık SiO_2 katkısı, özellikle akrilik vernik sisteminde a^* değerini artırarak sıcak renk karakterini korumuştur. Genel olarak TiO_2 'nin renk açıcı, SiO_2 'nin ise renk doygunluğunu koruyucu etki gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.2).

Varyans analizi sonuçlarına göre, a^* değerleri üzerinde ağaç türü, vernik türü ve nano katkı oranı faktörleri ile bu faktörlerin etkileşimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p \leq 0.05$). Kızılçam örneklerinde TiO_2 katkısı %1 oranında kırmızılığı artırırken (%52,56), oran %2'ye çıkarıldığında a^* değeri düşmüş ve yüzey yeşilimsi tona yönelmiştir. SiO_2 katkısı ise düzensiz etki göstermiş; düşük oranda azalma, yüksek oranda ise kırmızılıkta artış oluşturmıştır. İroko örneklerinde TiO_2 katkısı kırmızılığı belirgin biçimde azaltarak yüzeyi açmış, SiO_2 ise özellikle akrilik sistemde sıcak renk tonlarını korumuştur. Ünal çalışmasında da benzer şekilde, en yüksek a değeri %1 SiO_2 katkılı örneklerde (6.72), en düşük değer ise %3 TiO_2 katkılı örneklerde (0.43) elde edilmiştir. Her iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, TiO_2 'nin renk açıcı ve yeşil ton eğilimli, SiO_2 'nin ise kırmızılığı artırıcı ve renk doygunluğunu koruyucu etki gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır (Ünal, 2016).

Çizelge 4.5'te verilen varyans analizi sonuçlarına göre, $b^*b^{*}b^*$ değerleri üzerinde ağaç türü ve nano katkı oranı faktörleri istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturmıştır ($p < 0.05$). Buna karşın, vernik türü faktörünün $b^*b^{*}b^*$ parametresi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p > 0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de $b^*b^{*}b^*$ değerinde anlamlı etkiler göstermiştir. Bu sonuçlar, yüzeyin sarı-mavi renk

ekseninde (pozitif değerler sarılığı, negatif değerler maviliği ifade eder) meydana gelen değişimlerin, özellikle ağaç türü ve nano katkı oranının etkisiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5. b^* parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	16467.858	1	16467.858	7303.362	0.000*
Vernik Türü (B)	0.041	1	0.041	0.018	0.893
Etkileşim (AB)	171.829	1	171.829	76.205	0.000*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	6319.302	4	1579.826	700.640	0.000*
Etkileşim (AC)	598.385	4	149.596	66.345	0.000*
Etkileşim (BC)	168.371	4	42.093	18.668	0.000*
Etkileşim (ABC)	339.066	4	84.767	37.593	0.000*
Hata	405.870	180	2.255		
Toplam	61150.583	200			
Düzeltilmiş Toplam	24470.722	199			

Kızılçam örneklerinde b^* parametresi, nano katkı tipi ve oranına bağlı olarak belirgin değişimler göstermiştir. Akrilik vernikli kontrol grubunda 26.90 olan b^* değeri, TiO_2 katkısıyla önemli ölçüde azalmış; %1 ve %2 katkılarda sırasıyla 23.08 (%14.20 azalma) ve 7.41 (%72.45 azalma) olarak ölçülmüştür. Bu durum, TiO_2 'nin sarı tonları azaltarak yüzeyi daha nötr ve soğuk bir renge dönüştürdüğünü göstermektedir. SiO_2 katkısı ise daha sınırlı etki göstermiş; %1 oranında 24.47'ye (%9.03 azalma) düşerken, %2 oranında 26.67'ye (%0.86 azalma) yükselmiştir. Epoksi vernik uygulamalarında da benzer eğilim gözlenmiş, TiO_2 katkısı sarılığı azaltırken, %2 SiO_2 katkısı 31.35 değeriyle en yüksek sarı tonunu oluşturmuştur (Çizelge 4.6).

İroko örneklerinde b^* değerleri kızılıcama göre daha düşük olup katkıların etkisi daha belirgindir. Akrilik vernikli kontrol grubunda 8.54 olan b^* değeri, TiO_2 katkısıyla negatife düşmüş; %1 ve %2 oranlarında sırasıyla -0.97 (%111.36 azalma) ve -2.06 (%124.12 azalma) değerleri elde edilmiştir. Bu durum, TiO_2 'nin koyu renkli ahşaplarda belirgin bir mavileştirici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. SiO_2 katkısı ise ters yönde etki göstererek yüzeyin daha sıcak tonlar kazanmasına neden olmuştur. %1 katkıda 11.90 (%39.34 artış), %2 katkıda 9.65 (%13.00 artış) değerleri ölçülmüştür. Epoksi vernikte TiO_2 katkısı sarılığı azaltırken, %2 SiO_2 katkısı 7.13 değeriyle yüzeye daha sıcak ve altın tonlu bir görünüm kazandırmıştır (Çizelge 4.6).

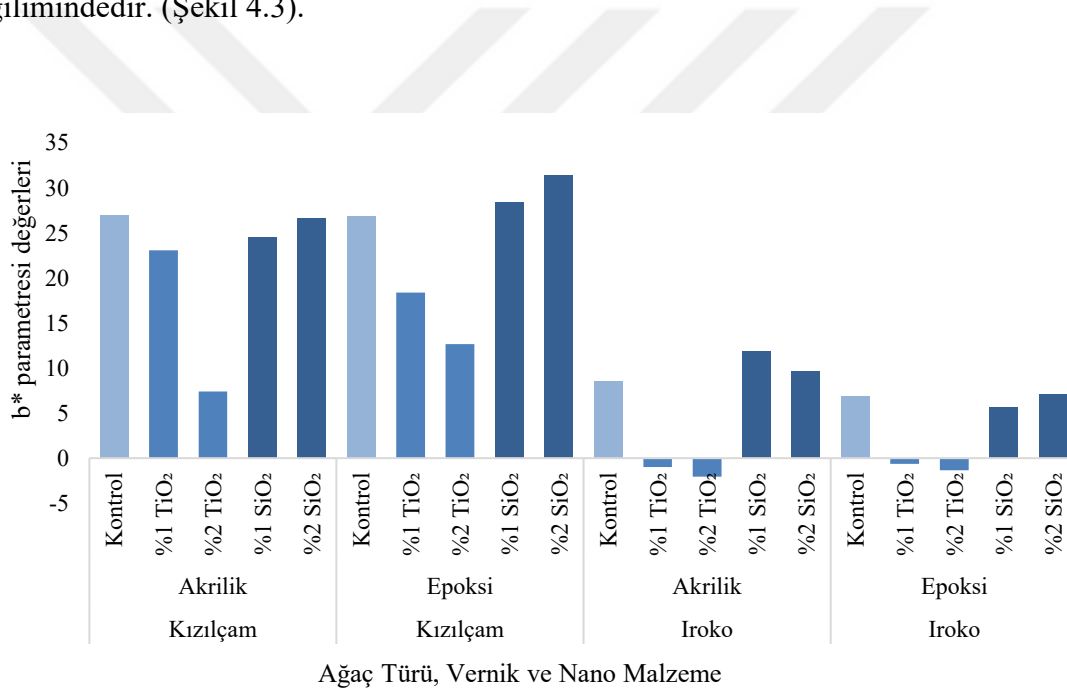
Çizelge 4.6 b* parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	26.90	-	C	0.44	26.32	27.42	1.6210
			1	23.08	↓14.20	E	2.45	20.30	26.57	1.6210
		TiO ₂	2	7.41	↓72.45	IJ	0.94	5.70	8.98	1.6210
			1	24.47	↓9.03	D	1.45	22.29	26.66	1.6210
		SiO ₂	2	26.67	↓0.86	C	1.72	23.53	29.17	1.6210
			2	26.67	↓0.86	C	1.72	23.53	29.17	1.6210
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	26.83	-	C	1.10	25.19	29.05	1.6210
			1	18.37	↓31.53	F	1.89	15.25	21.95	1.6210
		TiO ₂	2	12.66	↓52.81	G	2.83	7.18	14.86	1.6210
			1	28.43	↑5.96	B	1.72	25.59	30.85	1.6210
		SiO ₂	2	31.35	↑16.85	A*	0.72	30.49	32.45	1.6210
			2	31.35	↑16.85	A*	0.72	30.49	32.45	1.6210
Iroko	Akrilik	Kontrol	0	8.54	-	HI	1.12	6.35	9.50	1.3

								.
								1
								2
								-
								3
								0
								.
								3
								5
								-
								1
								4
								.
								2
								4
								2
								1
								.
								0
								5
								1
								6
								.
								3
								5
								1
								9
								.
								4
								7
								-
								9
								1
								.
								0
								6
								-
								4
								9
								.
								4
								1
								2
								5
								.
								6
								1
								1
								9
								.
								1
								3

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç

Kızılçam ve iroko örneklerinde b^* parametresi değerleri, uygulanan nano katkı tipi ve oranına göre belirgin farklılıklar göstermiştir. Kızılçamda TiO_2 katkısı, özellikle yüksek oranda uygulandığında b^* değerinde yaklaşık %70'e varan bir azalmaya yol açarken, SiO_2 katkısı daha sınırlı düzeyde etki göstermiştir. Epoksi vernikte TiO_2 katkısı sarı tonunu belirgin biçimde azaltmış, buna karşın SiO_2 katkısı özellikle yüksek oranda kullanıldığında yüzeyin daha sıcak ve canlı bir tona sahip olmasını sağlamıştır. İroko örneklerinde ise TiO_2 katkısı b^* değerinde %100'ü aşan bir düşüşe neden olarak sarı tonunu büyük ölçüde bastırmış, SiO_2 katkısı ise özellikle düşük oranlarda renk doygunluğunu artırıcı yönde etki göstermiştir. Genel olarak TiO_2 katkısı sarı tonunu azaltırken, SiO_2 katkısı yüzeyin renk canlılığını koruma ve sıcak ton kazandırma eğilimindedir. (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. b^* parametresi ortalama değerleri

Kızılçam ve iroko örneklerinde b^* parametresi değerleri, uygulanan nano katkı tipi ve oranına göre belirgin farklılıklar göstermiştir. Kızılçamda TiO_2 katkısı, özellikle yüksek oranda uygulandığında b^* değerinde yaklaşık %70'e varan bir azalmaya yol açarken, SiO_2 katkısı daha sınırlı düzeyde etki göstermiştir. Epoksi vernikte TiO_2 katkısı sarı tonunu belirgin biçimde azaltmış, buna karşın SiO_2 katkısı özellikle yüksek oranda kullanıldığında yüzeyin daha sıcak ve canlı bir tona sahip olmasını sağlamıştır. İroko örneklerinde ise TiO_2 katkısı b^* değerinde %100'ü aşan bir düşüşe neden olarak sarı

tonunu büyük ölçüde bastırması, SiO₂ katkısı ise özellikle düşük oranlarda renk doygunluğunu artırıcı yönde etki göstermiştir. Genel olarak TiO₂ katkısı sarı tonunu azaltırken, SiO₂ katkısı yüzeyin renk canlılığını koruma ve sıcak ton kazandırma eğilimindedir. (Şekil 4.3).

Varyans analizi sonuçlarına göre b* (sarı–mavi eksen) değerleri üzerinde ağaç türü ve nano katkı oranı faktörleri anlamlı farklılık göstermiştir (p<0.05). Kızılçam örneklerinde TiO₂ katkısı b* değerini önemli ölçüde düşürerek sarı tonlarını azaltmış, yüzeyi daha nötr bir renge dönüştürmüştür. SiO₂ katkısı ise yüzeydeki sıcak tonları koruyucu etki göstermiştir. İroko örneklerinde TiO₂ katkısı b* değerini negatife düşürerek belirgin mavileşmeye yol açarken, SiO₂ katkısı sarı tonları güçlendirmiştir. Ünal'ın (2016) çalışmasında da en yüksek b değeri kontrol ve %1 SiO₂ katkılı örneklerde, en düşük değer ise %3 TiO₂ katkılı su bazlı vernikli örneklerde elde edilmiştir. Her iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, TiO₂'nin sarılığı azaltarak soğuk ton eğilimi yarattığı, SiO₂'nin ise sıcak ve canlı renkleri koruma yönünde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.7'de verilen varyans analizi sonuçlarına göre, C* (renk doygunluğu) değerleri üzerinde ağaç türü ve nano katkı oranı faktörlerinin etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p<0.05). Buna karşın, vernik türü faktörü C* değeri üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir (p>0.05). Ayrıca, ağaç türü × vernik türü, ağaç türü × katkı oranı, vernik türü × katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç × vernik × katkı oranı) faktörleri de C* parametresinde anlamlı farklılıklar oluşturmuştur.

Çizelge 4.7. C* parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	p≤0.05 (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	11180.657	1	11180.657	4475.906	0.000*
Vernik Türü (B)	0.039	1	0.039	0.016	0.901
Etkileşim (AB)	264.247	1	264.247	105.785	0.000*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	7174.723	4	1793.681	718.057	0.000*
Etkileşim (AC)	615.816	4	153.954	61.632	0.000*
Etkileşim (BC)	186.067	4	46.517	18.622	0.000*
Etkileşim (ABC)	390.064	4	97.516	39.038	0.000*
Hata	449.634	180	2.498		
Toplam	74549.997	200			
Düzeltilmiş Toplam	20261.247	199			

Bu bulgular, yüzeyin renk doygunluğundaki değişimlerin esas olarak ağaç türü ve nano katkı oranına bağlı olarak şekillendiğini, vernik türünün ise bu değişim üzerinde tek başına belirleyici olmadığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, renk canlılığındaki farklılıkların daha çok ağaç malzemesinin doğal renk özellikleri ve nano katkı maddesinin optik etkilerinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Kızılçam örneklerinde C* parametresi değerleri, vernik türü ve nano katkı maddesine bağlı olarak belirgin değişimler göstermiştir. Akrilik vernikli kontrol grubunda C* değeri 27.64 olarak ölçülmüş, TiO₂ katkısı %1 oranında 25.11'e (%9.15 azalma), %2 oranında ise 8.23'e (%70.22 azalma) düşerek yüzeyin renk doygunluğunu önemli ölçüde azaltmıştır. SiO₂ katkısı ise daha sınırlı bir etki göstermiş; %1 oranında 25.15 (%9.01 azalma) değerine gerilerken, %2 oranında 27.81 (%0.62 artış) ile kontrol değerine oldukça yakın bir sonuç vermiştir. Epoksi vernikli yüzeylerde de benzer eğilim gözlenmiş, TiO₂ katkısı C* değerini %27.90–%49.55 oranlarında azaltırken, SiO₂ katkısı özellikle %2 oranında 33.75 değeriyle %21.01 artış göstermiştir. Bu sonuçlar, TiO₂'nin renk doygunluğunu düşürerek yüzeyin daha mat bir görünüm kazanmasına, SiO₂'nin ise özellikle yüksek oranda kullanıldığında renk canlılığını artırarak yüzeyin parlaklığını korumasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 4.8).

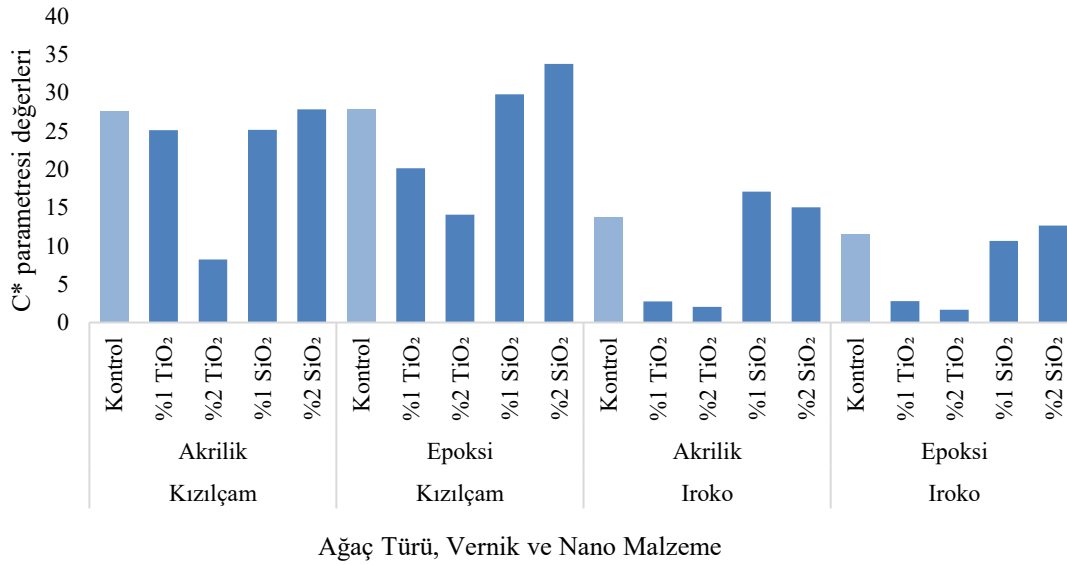
Çizelge 4.8. C* parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	27.64	-	C	0.51	27.03	28.42	1.86
		TiO ₂	1	25.11	↓9.15	D	2.48	22.66	29.29	9.88
			2	8.23	↓70.22	K	0.91	6.85	9.96	11.01
		SiO ₂	1	25.15	↓9.01	D	1.51	22.99	27.37	6.00
			2	27.81	↑0.62	C	1.86	24.44	30.72	6.67
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	27.89	-	C	1.17	26.31	30.22	4.20
		TiO ₂	1	20.11	↓27.90	E	1.77	16.81	23.60	8.82
			2	14.07	↓49.55	GH	2.98	8.27	16.81	21.20
		SiO ₂	1	29.76	↑6.70	B	1.92	26.97	32.66	6.45
			2	33.75	↑21.01	A*	1.00	32.55	35.42	2.98
Iroko	Akrilik	Kontrol	0	13.81	-	GH	1.25	11.57	14.79	9.06
		TiO ₂	1	2.74	↓80.16	L	0.55	2.03	3.85	20.09
			2	2.03	↓85.30	L	0.41	1.19	2.59	20.31
		SiO ₂	1	17.09	↑23.75	F	2.30	14.12	20.43	13.48
			2	15.01	↑8.69	G	1.68	11.67	17.67	11.22
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	11.56	-	IJ	1.58	9.74	14.83	13.67
		TiO ₂	1	2.81	↓75.69	L	0.44	2.28	3.28	15.71
			2	1.66	↓85.64	L**	0.48	0.79	2.05	29.10

SiO ₂	1	10.64	↓7.96	J	1.85	7.63	12.86	17.35
	2	12.65	↑9.43	HI	1.54	10.15	15.24	12.19

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç

İroko örneklerinde C* değerleri Kızılçam'a göre daha düşük olup, nano katkıların etkisi daha belirgin olmuştur. Akrilik vernikli kontrol grubunda 13.81 olarak ölçülen C* değeri, TiO₂ katkısı ile %1 oranında 2.74'e (%80.16 azalma) ve %2 oranında 2.03'e (%85.30 azalma) düşmüştür. Buna karşılık SiO₂ katkısı renk doygunluğunu artırmış; %1 oranında 17.09 (%23.75 artış), %2 oranında 15.01 (%8.69 artış) değerleri elde edilmiştir. Epoksi vernikli yüzeylerde ise TiO₂ katkısı C* değerini sırasıyla 2.81 (%75.69 azalma) ve 1.66 (%85.64 azalma) seviyelerine düşürürken, SiO₂ katkısı %1 oranında 10.64 (%7.96 azalma), %2 oranında ise 12.65 (%9.43 artış) ile renk doygunluğunu kısmen artırmıştır. (Çizelge 4.8).



Şekil 4.4. C* parametresi ortalama değerleri

C* parametresi sonuçlarına göre, yüzeylerin renk doygunluğu hem vernik türü hem de nano katkı maddesine bağlı olarak önemli ölçüde değişmiştir. TiO₂ katkısı, her iki ağaç türünde de renk doygunluğunu belirgin biçimde azaltarak yüzeylerin daha mat ve solgun görünmesine neden olmuştur. Bu etki özellikle yüksek katkı oranlarında daha belirgindir. Buna karşılık SiO₂ katkısı, özellikle epoksi vernik sistemlerinde C* değerlerini artırarak yüzeyin daha canlı ve parlak bir renk karakteri kazanmasına katkı sağlamıştır. Genel

olarak TiO_2 'nin renk doygunluğunu düşürücü, SiO_2 'nin ise parlaklık ve renk canlılığını koruyucu yönde etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.

TiO_2 katkısının her iki ağaç türünde de renk doygunluğunu azalttığı ve yüzeylerin daha mat ve solgun bir görünüme kavuşmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, TiO_2 'nin ışığı dağıtıcı ve yansıtıcı özelliklerinden kaynaklanıyor olabilir. Literatürde, TiO_2 'nin optik özellikleri nedeniyle yüzeylerde mat bir görünüm oluşturduğu ve renk doygunluğunu azalttığı rapor edilmiştir (Diebold ve ark., 2013). Bu bağlamda, çalışmamızın bulguları literatürle uyumludur. Ancak, yüksek katkı oranlarında TiO_2 'nin etkisinin daha belirgin hale gelmesi, nano katkı oranının kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle dekoratif kaplamalarda TiO_2 kullanımının sınırlı tutulması gerektiğini göstermektedir.

Öte yandan, SiO_2 katkısının özellikle epoksi vernik sistemlerinde C^* değerlerini artırdığı ve yüzeyin daha canlı bir renk karakterine kavuşmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. SiO_2 'nin bu etkisi, yüzeydeki ışık yansımalarını artırarak parlaklığı desteklemesiyle açıklanabilir. Literatürde, SiO_2 'nin kaplama yüzeyinde homojen bir dağılım sağlayarak yüzey kalitesini iyileştirdiği ve dolaylı olarak optik performansı artırabileceği belirtilmiştir (Danischewski, 2023). Dolayısıyla, çalışmamızın bulguları mevcut literatürle paralellik göstermektedir.

Çizelge 4.9'da verilen varyans analizi sonuçlarına göre, h° (renk tonu açısı) parametresi üzerinde ağaç türü ve nano katkı oranı faktörlerinin etkisi istatistiksel olarak oldukça anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Buna karşın, vernik türü faktörünün h° değeri üzerinde anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir ($p > 0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de h° parametresinde anlamlı farklılıklar oluşturmuştur. Bu sonuçlar, renk tonundaki değişimlerin esas olarak ağaç türü ile nano katkı oranının etkileşimine bağlı olduğunu ve özellikle nano katkı maddesinin oranındaki artışın renk yönünü belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. Vernik türünün ise tek başına renk tonunu değiştirmede sınırlı bir role sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kızılçam örneklerinde h° değerleri hem vernik türü hem de nano katkı maddesine bağlı olarak belirgin değişimler göstermiştir. Akrilik vernikli kontrol grubunda 76.46° ile

nispeten yüksek bir renk tonu açısı elde edilmiştir. TiO₂ katkısı özellikle %2 oranında kullanıldığında h° değerini 64.13°'ye düşürerek yaklaşık %16 azalma oluşturmuş, bu da yüzey renginin kırmızımsı-sarı tonlardan daha koyu ve mat bir görünüme kaydığını göstermiştir. SiO₂ katkısı ise h° değerini büyük ölçüde korumuş; %1 oranında katkı yapılan örneklerde 76.62° ile kontrol grubuna oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Epoksi vernikte de benzer eğilim izlenmiş; TiO₂ katkısı %2 oranında 64.06° değeriyle yaklaşık %13 düşüş yaratmış, buna karşın %1 SiO₂ katkısı 72.82° ile renk tonunu büyük ölçüde sabit tutmuştur (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.9. h° parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	p≤0.05 (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	281685.919	1	281685.919	3624.307	0.000*
Vernik Türü (B)	12.405	1	12.405	0.160	0.690
Etkileşim (AB)	460.227	1	460.227	5.922	0.016*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	848315.301	4	212078.825	2728.709	0.000*
Etkileşim (AC)	953747.646	4	238436.912	3067.844	0.000*
Etkileşim (BC)	3271.673	4	817.918	10.524	0.000*
Etkileşim (ABC)	2106.588	4	526.647	6.776	0.000*
Hata	13989.837	180	77.721		
Toplam	4426074.066	200			
Düzeltilmiş Toplam	2103589.597	199			

İroko örneklerinde h° değerleri çok farklı bir davranış göstermiştir. Akrilik vernikli kontrol grubunda 37.94° olarak ölçülen h° değeri, TiO₂ katkısı ile olağanüstü artış göstermiş; %1 oranında 337.63°, %2 oranında ise 258.67° değerlerine yükselmiştir. Bu durum, yüzeyin belirgin biçimde daha açık, sarımsı tonlara yöneldiğini göstermektedir. SiO₂ katkısı ise daha ılımlı etki sergileyerek %1 oranında 43.58° ile yaklaşık %15 artış, %2 oranında ise 39.80° ile kontrol değerine yakın sonuç vermiştir. Epoksi vernikte TiO₂ katkısı %1 oranında 345.25°'ye çıkarak en yüksek değeri oluşturmuş, buna karşılık %1 SiO₂ katkısı 31.79°'ye düşerek %11 azalma göstermiştir (Çizelge 4.10).

Kızılçam örneklerinde renk tonu açısı (h°) değerleri hem vernik türüne hem de nano katkı tipine bağlı olarak farklılık göstermiştir. TiO₂ katkısı genel olarak yüzey renginin sıcak tonlardan soğuk tonlara kaymasına neden olmuş, özellikle yüksek katkı oranlarında renk tonunda belirgin bir azalma oluşturmuştur. Buna karşın SiO₂ katkısı, yüzeyin doğal tonunu büyük ölçüde korumuş ve renk değişimini sınırlı düzeyde etkilemiştir. Epoksi vernik uygulamalarında da benzer eğilim gözlenmiş; TiO₂ yüzey rengini soğuturken,

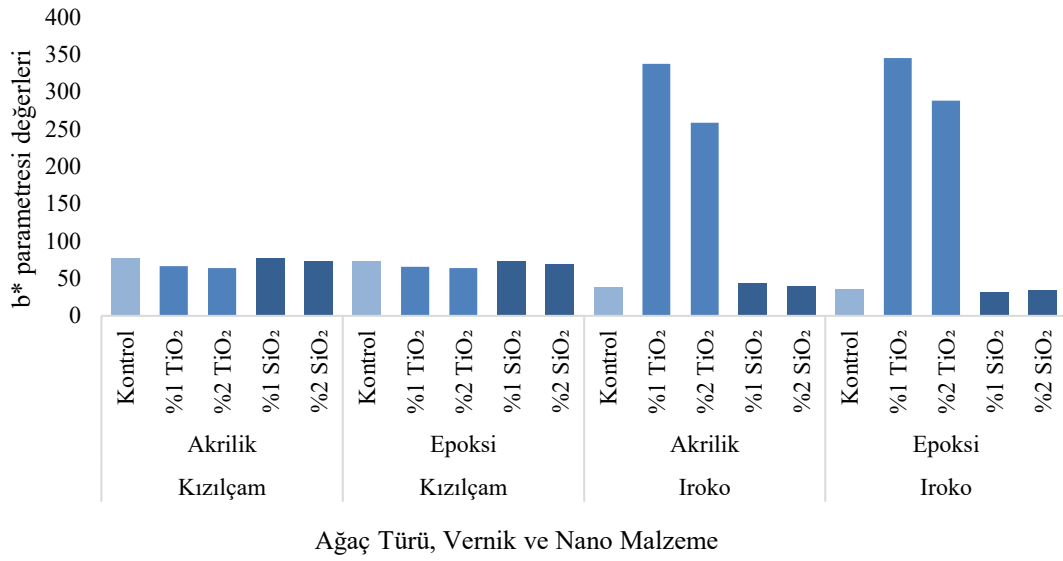
SiO₂ katkısı renk stabilitesini desteklemiştir. İroko örneklerinde ise TiO₂ katkısının etkisi oldukça belirgin olmuş, renk tonu açısını dramatik biçimde değiştirerek yüzeyde beklenmedik ton dönüşümlerine yol açmıştır. SiO₂ katkısı ise daha dengeli bir davranış sergilemiş, yüzeyin doğal sıcak rengini kısmen korumuştur. Genel olarak, TiO₂ katkısının renk tonunu radikal biçimde dönüştürdüğü, SiO₂'nin ise ton kararlılığını korumada daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.10. h° parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Orta-lama	Değişim (%)	Homo-jenlik Grubu	Standart Sapma	Mini-mum	Maksi-mum	V ar ya sy on K at sa yı sı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	76.46	-	D	1.16	74.60	78.10	1.523
		TiO ₂	1	66.77	↓12.67	EF	2.46	63.69	69.30	1.696
			2	64.13	↓16.13	F	4.34	56.20	70.30	1.772
		SiO ₂	1	76.62	↑0.21	D	1.65	73.60	79.40	1.151
			2	73.52	↓3.85	DE	1.21	71.60	75.60	1.644
		Epoksi Reçine	Kontrol	0	73.62	-	DE	1.38	71.90	77.20
	TiO ₂		1	65.90	↓10.49	EF	2.76	59.30	68.40	1.877
			2	64.06	↓12.99	F	4.73	58.20	72.80	1.392
	SiO ₂		1	72.82	↓1.09	DEF	1.64	70.80	76.00	1.1

								2
								5
								2
		2	68.42	↓7.06	DEF	1.90	65.30	70.80
								·
								7
								7
								5
		Kontrol	0	37.94	-	GH	2.06	33.20
								40.10
								·
								4
								3
								2
			1	337.63	↑789.91	A	8.77	326.00
								355.00
		TiO ₂						·
								6
								0
								1
	Akrilik		2	258.67	↑581.79	C	2.97	254.60
								263.60
								·
								1
								5
								1
			1	43.58	↑14.87	G	4.59	35.30
								49.60
		SiO ₂						·
								5
								3
								6
			2	39.80	↑4.90	GH	2.59	36.50
								44.50
								·
								5
								0
	Iroko							7
		Kontrol	0	35.81	-	GH	2.85	32.00
								39.50
								·
								9
								5
								4
			1	345.25	↑864.12	A*	15.67	317.90
								356.20
		TiO ₂						·
								5
								4
								1
								1
	Epoksi		2	288.43	↑705.45	B	33.08	259.10
	Reçine							335.80
								·
								4
								7
								1
								0
			1	31.79	↓11.23	H**	3.48	26.10
								36.40
		SiO ₂						·
								9
								3
								8
			2	34.00	↓5.05	H	2.82	29.80
								38.10
								·
								3
								1

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç



Şekil 4.5. h° parametresi ortalama değerleri

TiO₂'nin yüzey kaplamalarında kullanımıyla ilgili literatürde elde edilen bulgular, bu çalışmanın sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Miklečić vd. (2017), kayın odununa uygulanan ısıtılmış işlem sonrası TiO₂ ile zenginleştirilmiş su bazlı verniklerin yüzeydeki renk stabilitesini artırdığını ve UV ışınlarına karşı koruma sağladığını belirtmiştir. Benzer şekilde Fufa vd. (2013), Norveç ladininde TiO₂ katkılı su bazlı verniklerin UV yaşlandırmaya bağlı renk değişimlerini azalttığını ve özellikle sıcak tonların azalmasına katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Moya vd. (2017) de %1,5 oranında TiO₂ ilavesinin renk değişimlerini sınırlayarak yüzey stabilitesini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bak (2018) ise TiO₂'nin UV ışınlarına karşı etkin bir bariyer oluşturarak renk değişimlerini en aza indirme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmalarla uyumlu olarak, mevcut araştırmada da TiO₂ katkısının özellikle yüksek oranlarda yüzeyin renk doygunluğunu azaltarak mat bir görünüm oluşturduğu, ancak genel olarak renk stabilitesini artırdığı belirlenmiştir.

4.2.Parlaklık Ölçümü

Bu bölüm, yüzey kaplama malzemelerine eklenen TiO₂ ve SiO₂ nanopartiküllerinin kaplamaların parlaklık değerleri üzerindeki etkisini inceleyen çalışmanın varyans analizi (ANOVA) ve çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına dayanmaktadır. Analiz, Çizelge 4.3'ten Çizelge 4'e kadar sunulan verilerin istatistiksel geçerliliğini ve farklı katkı oranlarının parlaklık üzerindeki etkilerinin büyüklüğünü belirlemektedir. Bu kapsamda,

nanoparçacık katkısının kaplama yüzeylerinin ışık yansıtma özelliklerinde oluşturduğu değişimler nicel olarak değerlendirilmiştir. Parlaklık, kaplama yüzeyinin ışığı yansıtma kapasitesini belirleyen temel optik özelliktir. Parlaklık değerinin yüksek olması, yüzeyin daha düzgün, homojen ve kaliteli bir film tabakasına sahip olduğunu gösterir. Bu çalışmada, elde edilen parlaklık değerleri, kaplamanın ışık yansıtma performansını ve genel görünüm kalitesini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, yüzeyin düzgünlüğü ve vernik tabakasının bütünlüğü hakkında nicel bilgi sağlamaktadır.

Çizelge 4.11’de liflere dik yönde ölçülen parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türü ($p<0.05$), vernik türü ($p<0.05$) ve nano katkı maddesi oranı ($p<0.05$) faktörlerinin yüzey parlaklığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörlerinin de anlamlı düzeyde farklılık yarattığı belirlenmiştir. Özellikle vernik türü, en yüksek F değerine ($F=666.088$) sahip olup yüzey parlaklığı üzerinde en baskın etkiyi göstermiştir. Bu durum, vernik filminin kimyasal yapısı ve ışık yansıtma özelliklerinin parlaklığı belirlemede temel rol oynadığını göstermektedir. Ağaç türü ve nano katkı oranı da parlaklığı etkilemiş; özellikle nano katkı ilavesi yüzeyin yansıtma özelliğinde belirgin değişimlere yol açmıştır.

Çizelge 4.11. Liflere dik yönde parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	870.696	1	870.696	40.169	0.000*
Vernik Türü (B)	14438.102	1	14438.102	666.088	0.000*
Etkileşim (AB)	335.664	1	335.664	15.486	0.000*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	250.763	4	62.691	2.892	0.024*
Etkileşim (AC)	1398.395	4	349.599	16.128	0.000*
Etkileşim (BC)	729.086	4	182.272	8.409	0.000*
Etkileşim (ABC)	1134.199	4	283.550	13.081	0.000*
Hata	3901.673	180	21.676		
Toplam	1478020.690	200			
Düzeltilmiş Toplam	23058.579	199			

Kızılçam örneklerinde akrilik vernikli kontrol grubunun 79.43 birimlik parlaklık değeri, TiO_2 katkısıyla belirgin şekilde artmıştır. %1 oranında 84.72’ye (%6.7 artış), %2 oranında ise 87.42’ye (%10.1 artış) ulaşan değerler, TiO_2 ’nin ışık saçılmasını azaltarak yüzey yansıtıcılığını güçlendirdiğini göstermektedir. SiO_2 katkısı %1 oranında 69.63 ile

parlaklığı %12.3 düşürmüş, ancak %2 oranında 79.69 değeriyle kontrol seviyesine oldukça yaklaşmıştır. Epoksi vernikli Kızılçam örneklerinde ise kontrol grubunun 92.19 birimlik değeri, TiO₂ katkısı ile sırasıyla 96.03 (%4.2 artış) ve 96.18 (%4.3 artış) seviyelerine çıkmıştır. SiO₂ katkısı %1 oranında 96.90 ile en yüksek parlaklık değerini oluşturmuş (%5.1 artış), %2 oranında ise 91.60 ile sınırlı bir azalma göstermiştir (Çizelge 4.12).

İroko örneklerinde akrilik vernikli kontrol grubu 78.41 birim parlaklık değeriyle referans alınmıştır. TiO₂ katkısı %1 oranında 74.04'e (%5.6 azalma), %2 oranında ise 64.07'ye (%18.4 azalma) düşerek yüzey parlaklığını belirgin biçimde azaltmıştır. SiO₂ katkısı %1 oranında 74.31 (%5.2 azalma), %2 oranında 76.24 (%2.7 azalma) değerleriyle kontrol seviyesine yakın sonuçlar vermiştir. Epoksi vernikte ise kontrol grubu 89.52 birim iken, TiO₂ katkısı %1'de 93.28 (%4.2 artış), %2'de 92.86 (%3.7 artış) değerlerine ulaşmıştır. SiO₂ katkısı %1 oranında 93.60 (%4.6 artış) ve %2 oranında 95.73 (%6.9 artış) ile en yüksek parlaklık değerini sağlamıştır (Çizelge 4.12).

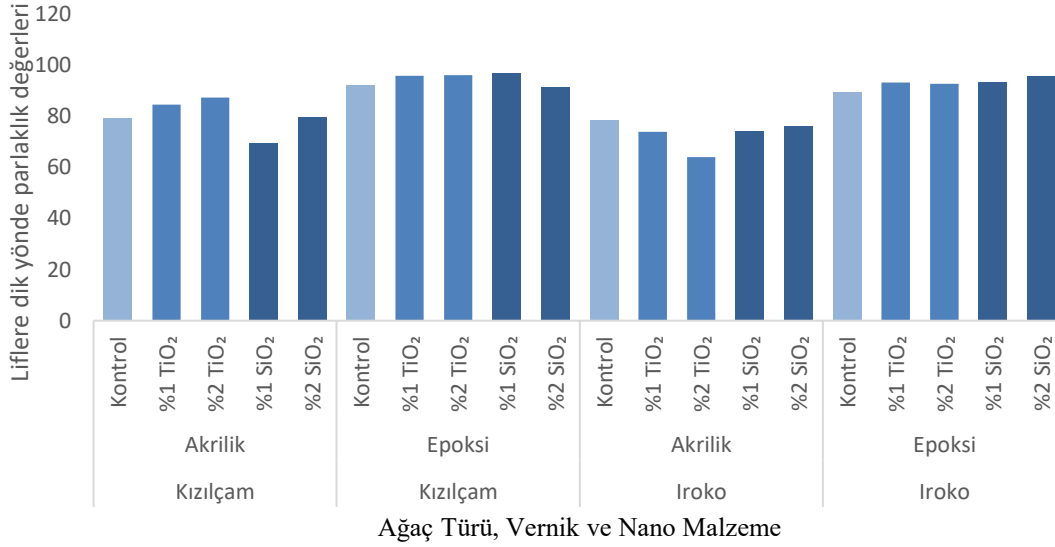
Çizelge 4.12. Liflere dik yönde parlaklık değerlerine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	79.43	-	F	7.25	60.80	87.30	9
			1	84.72	↑6.66	E	4.12	78.50	90.60	124
		TiO ₂	2	87.42	↑10.06	DE	3.66	79.70	91.30	864
			1	69.63	↓12.34	H	5.39	61.50	77.30	187
		SiO ₂	2	79.69	↑0.33	F	3.80	74.80	86.20	734

Epoksi Reçine	Kontrol	0	92.19	-	ABC	4.49	85.20	97.30	7 4 · 8 7 2 · 2 8 2 · 1 6 3 · 4 5 5 · 9 4 5
		1	96.03	↑4.17	AB	2.19	92.00	98.50	0 9 1 0 · 8 7 1 0 · 8 1 6 · 1 7 5 · 7 5 6
		2	96.18	↑4.33	AB	2.07	91.00	98.90	· 3 · 1 · 7 · 5 · 6 · 2 · 3 · 4 · 3 ·

							7
							0
							2
2	95.73	↑6.94	AB	2.23	91.80	99.40	3
							3

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç



Şekil 4.6. Liflere dik yönde parlaklık değerleri

TiO₂ ve SiO₂ nanoparçacık katkılarının etkileri incelendiğinde, TiO₂'nin tüm vernik türlerinde SiO₂'ye göre daha yüksek parlaklık sağladığı görülmüştür. Akrilik vernikte kontrol grubu en düşük parlaklığa sahipken, %2 TiO₂ ve SiO₂ katkılarıyla parlaklık belirgin şekilde artmış, TiO₂ katkısı daha etkili olmuştur. Kızılçam örneklerinde parlaklık artışı sınırlı kalmış, bu da yüzey yapısının nanoparçacıklarla etkileşiminin zayıf olduğunu göstermektedir. Epoksi vernikte ise en yüksek parlaklık değerleri elde edilmiş, özellikle TiO₂ katkısı en güçlü sonucu vermiştir. Iroko örneklerinde nanoparçacık katkıları parlaklığı artırsa da doğal yağlı yapı nedeniyle etki epoksi kadar belirgin olmamıştır (Şekil 4.6)

Çizelge 4.13'te liflere paralel yönde ölçülen parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türü ($p < 0.05$), vernik türü ($p < 0.05$) ve nano katkı oranı ($p < 0.05$) faktörlerinin yüzey parlaklığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı, vernik türü $\times$ katkı

oranı ve üçlü etkileşim (ağaç × vernik × katkı oranı) faktörleri de anlamlı düzeyde farklılık oluşturmuştur. En yüksek F değerine sahip olan vernik türü ($F=630.330$), yüzey parlaklığı üzerinde en belirleyici faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuç, kullanılan vernik sisteminin optik yansıma özelliklerinin parlaklık performansını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Ağaç türü ve nano katkı oranı da parlaklık değerini önemli ölçüde etkilemiş; nano katkı ilavesiyle birlikte yüzeyde ışık yansıtma kapasitesinin değiştiği görülmüştür.

Çizelge 4.13. Liflere paralel yönde parlaklık değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	703.125	1	703.125	47.490	0.000*
Vernik Türü (B)	9332.512	1	9332.512	630.330	0.000*
Etkileşim (AB)	159.490	1	159.490	10.772	0.001*
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	155.006	4	38.752	2.617	0.037*
Etkileşim (AC)	287.311	4	71.828	4.851	0.001*
Etkileşim (BC)	436.894	4	109.224	7.377	0.000*
Etkileşim (ABC)	367.464	4	91.866	6.205	0.000*
Hata	2665.038	180	14.806		
Toplam	1573449.520	200			
Düzeltilmiş Toplam	14106.840	199			

Liflere paralel yönde yapılan ölçümlerde Kızılçam örnekleri, vernik türü ve nano katkı oranına bağlı olarak belirgin parlaklık farkları göstermiştir. Akrilik vernikli kontrol grubu 85.24 birim ile referans alınmış; TiO_2 katkısı %1 oranında 86.33'e (%1.28 artış), %2 oranında 89.95'e (%5.53 artış) yükselmiştir. Buna karşılık SiO_2 katkısı, %1 oranında 78.38'e (%8.05 azalma), %2 oranında 81.28'e (%4.65 azalma) düşerek yüzeyi matlaştırmıştır. Epoksi vernikli Kızılçam örneklerinde kontrol grubu 93.37 birimken, TiO_2 katkısı %1'de 95.73, %2'de 96.61'e ulaşmıştır. En yüksek parlaklık SiO_2 'nin %1 oranında kullanıldığı durumda (99.77 birim, %6.85 artış) elde edilmiştir. Ancak %2 SiO_2 'de parlaklık 95.08'e gerilemiştir. Bu sonuçlar, TiO_2 'nin yansıtıcılığı artırdığını, SiO_2 'nin ise epoksi sistemde optimum oranda kullanıldığında yüzey düzgünlüğünü geliştirdiğini göstermektedir (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14. Liflere paralel yönde parlaklık değerlerine ait ölçüm sonuçları

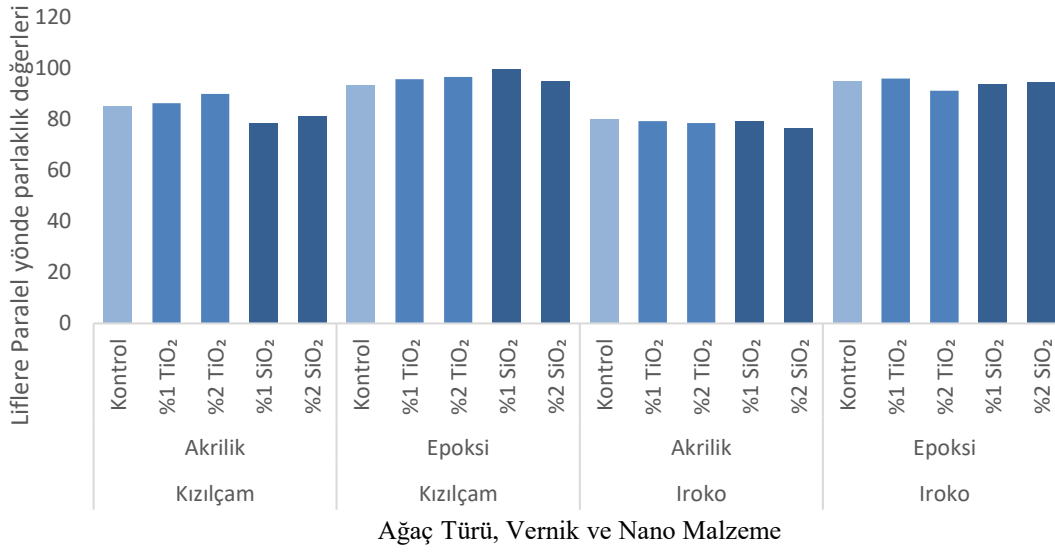
Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon
-----------	-------------	--------------------	-----------------	----------	-------------	------------------	----------------	---------	----------	-----------

									K at sa yıs ı	
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	85.24	-	E	2.08	81.90	87.60	2 4 4 5
		TiO ₂	1	86.33	↑1.28	E	4.45	78.10	90.50	1 6 4
			2	89.95	↑5.53	D	4.14	80.80	93.10	6 0 5
		SiO ₂	1	78.38	↓8.05	FG	4.11	69.50	83.90	2 4 7
			2	81.28	↓4.65	F	6.32	67.00	87.90	7 7
										4
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	93.37	-	BCD	3.77	85.70	98.10	0 4 3
		TiO ₂	1	95.73	↑2.53	B	3.52	89.70	99.90	6 8 4
			2	96.61	↑3.47	AB	3.87	86.50	99.70	0 0 1
		SiO ₂	1	99.77	↑6.85	A*	1.14	97.90	102.00	1 4 3
			2	95.08	↑1.83	B	3.06	89.90	100.00	2 2
										6
Iroko	Akrilik	Kontrol	0	79.90	-	FG	5.05	69.20	84.50	3 2 3
		TiO ₂	1	79.27	↓0.79	FG	2.63	75.20	83.00	3 2 8
			2	78.51	↓1.74	FG	6.35	68.10	87.20	0 9

Epoksi Reçine	SiO ₂	1	79.42	↓0.60	FG	5.24	70.20	86.20	6
		2	76.40	↓4.38	G**	2.67	72.90	81.00	6
									0
									3
	TiO ₂	0	95.10	-	B	2.00	90.80	97.10	4
		1	95.97	↑0.91	B	1.66	92.40	98.10	9
		2	91.18	↓4.12	CD	4.13	81.50	95.60	2
									1
	SiO ₂	1	93.71	↓1.46	BC	2.79	90.40	98.60	1
		2	94.78	↓0.34	BC	2.63	88.70	97.60	7
									3
									2

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç

İroko örneklerinde paralel yöndeki parlaklık değerleri genel olarak daha düşük seyretmiştir. Akrilik vernikli kontrol grubu 79.90 birimdir; TiO₂ katkısı %1’de 79.27 (%0.79 azalma), %2’de 78.51 (%1.74 azalma) değerine inmiştir. SiO₂ katkısı da parlaklığı azaltarak %1’de 79.42 (%0.60), %2’de 76.40 (%4.38 azalma) seviyelerine düşürmüştür. Bu durum, irokonun yağlı ve gözenekli yapısının vernik filminin homojen yayılımını engellemesiyle ilişkilidir. Epoksi vernikli İroko örneklerinde kontrol 95.10 birim olup, TiO₂ katkısı %1’de 95.97’ye (%0.91 artış), %2’de 91.18’e (%4.12 azalma) değişmiştir. SiO₂ katkısı ise %1’de 93.71 (%1.46 azalma), %2’de 94.78 (%0.34 azalma) değerleriyle hafif parlaklık kaybı oluşturmuştur. Bu, epoksi sistemlerin İroko yüzeyinde genel olarak yüksek parlaklık sağladığını ancak fazla katkının optik dengeyi bozduğunu göstermektedir. (Çizelge 4.14).



Şekil 4.7. Liflere dik yönde parlaklık değerleri

Liflere paralel yönde yapılan parlaklık ölçümleri, ağaç türü, vernik yapısı ve nano katkı tipinin yüzeyin optik performansını belirgin biçimde etkilediğini göstermiştir. Kızılçam yüzeylerinde TiO₂, özellikle %2 oranında parlaklığı artırırken, SiO₂ katkısı düşük oranlarda epoksi sistemlerde en yüksek parlaklık değerine ulaşmıştır. Buna karşılık, İroko yüzeylerinde her iki nano katkı da genellikle parlaklıkta azalma eğilimi göstermiştir.

Bu çalışma, TiO₂ ve SiO₂ nanoparçacık katkılarının yüzey parlaklığı üzerindeki etkisinin vernik türü ve ağaç yapısına bağlı olarak farklılaştığını göstermektedir. Varyans analizleri ($p < 0.05$), tüm faktörlerin parlaklık üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu; özellikle vernik türünün belirleyici unsur olduğunu ortaya koymuştur. Kızılçam örneklerinde TiO₂ katkısı, özellikle epoksi verniklerde %4–10 oranında parlaklık artışı sağlamış; SiO₂ düşük oranlarda yüzey düzgünlüğünü artırarak optimum parlaklık oluşturmuştur. İroko gibi yağlı ağaçlarda ise nanoparçacık etkisi sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, Ünal'ın (2017) TiO₂'nin yansıtıcılığı artırıcı ve SiO₂'nin yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etkisini vurgulayan bulgularıyla uyumludur. Karamanoğlu'nun (2019) çalışması ise daha çok mekanik ve fiziksel performansa odaklanmış, parlaklık parametresini ayrıntılı ele almamıştır. Dolayısıyla bu çalışma, TiO₂'nin epoksi sistemlerde optik performansı artırdığını ve SiO₂'nin düşük oranlarda yüzey düzgünlüğünü iyileştirdiğini nicel olarak ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır.

4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi (R_a , R_q , R_z)

Bu bölüm, yüzey kaplama malzemelerine eklenen TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a , R_q , R_z) üzerindeki etkisini inceleyen çalışmanın varyans analizi (ANOVA) ve çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına dayanmaktadır.

Çizelge 4.15'ten Çizelge 4.17'e kadar verilen sonuçlar, yapılan analizlerin istatistiksel olarak geçerli olduğunu göstermekte ve farklı katkı oranlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Bu kapsamda R_a , R_q ve R_z pürüzlülük parametreleri esas alınarak veriler değerlendirilmiştir. R_a , R_q ve R_z değerleri; kaplama filminin görsel kalitesi, yüzeye tutunma performansı ve aşınma direnci açısından belirleyici temel yüzey özellikleridir. Genel olarak pürüzlülük değerlerinin düşük olması, daha düzgün ve homojen bir yüzey yapısını, dolayısıyla daha yüksek kaplama kalitesini ifade etmektedir.

Bu doğrultuda nanoparçacık katkısının, vernik uygulanmış ahşap örneklerin yüzey düzgünlüğü ve film bütünlüğü üzerindeki etkisi nicel olarak analiz edilmiş ve yüzey kalitesindeki değişimler üç temel pürüzlülük parametresi üzerinden değerlendirilmiştir. Çizelge 4.15'de sunulan varyans analizi sonuçlarına göre vernik türü ($p<0.05$) ve nano katkı oranı ($p<0.05$) R_a üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahiptir. Buna ek olarak ağaç türü $\times$ nano katkı oranı, vernik türü $\times$ nano katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı farklılık oluşturmuştur. Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek bir faktörden değil, vernik tipi, katkı oranı ve ağaç türünün birlikte etkisinden etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.15. R_a parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	0.002	1	0.002	0.391	0.533
Vernik Türü (B)	1.672	1	1.672	418.556	0.000*
Etkileşim (AB)	0.000	1	0.000	0.061	0.805
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	0.689	4	0.172	43.102	0.000*
Etkileşim (AC)	0.142	4	0.035	8.872	0.000*
Etkileşim (BC)	0.326	4	0.081	20.386	0.000*
Etkileşim (ABC)	0.270	4	0.067	16.872	0.000*

Hata	0.719	180	0.004
Toplam	10.377	200	
Düzeltilmiş Toplam	3.819	199	

Çizelge 4.16. R_a parametresine ait ölçüm sonuçları

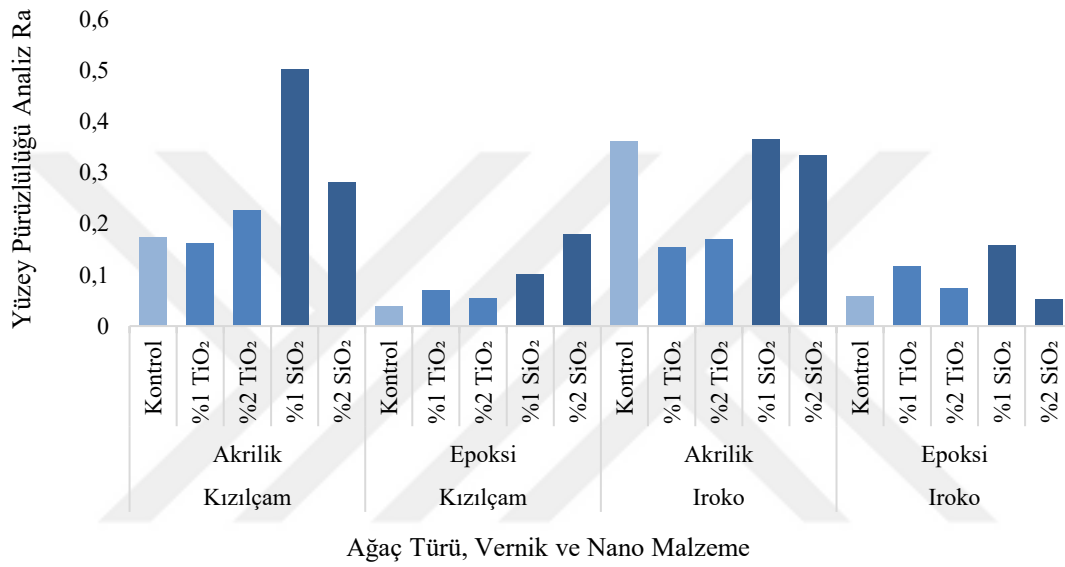
Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Orta-lama	Değişim (%)	Homo-jenlik Grubu	Standart Sapma	Mini-mum	Maksi-mum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	0.173	-	EF	0.03	0.120	0.194	14.84
		TiO ₂	1	0.162	↓6.36	F	0.02	0.126	0.198	12.50
			2	0.226	↑30.64	DE	0.05	0.152	0.294	20.14
		SiO ₂	1	0.502	↑190.17	A*	0.13	0.313	0.673	26.27
			2	0.280	↑61.85	CD	0.07	0.153	0.365	24.43
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	0.038	-	I**	0.01	0.018	0.056	39.07
		TiO ₂	1	0.069	↑81.58	HI	0.03	0.024	0.132	50.31
			2	0.055	↑44.74	HI	0.01	0.045	0.075	20.74
		SiO ₂	1	0.100	↑163.16	GHI	0.03	0.063	0.178	32.18
			2	0.179	↑371.05	EF	0.03	0.117	0.210	16.42
		Akrilik	Kontrol	0	0.361	B	0.11	0.205	0.499	30.47
			1	0.153	↓57.62	FG	0.02	0.125	0.192	14.91
			2	0.169	↓53.19	EF	0.03	0.121	0.195	15.71
			1	0.365	↑1.11	B	0.17	0.250	0.808	45.72
			2	0.334	↓7.48	BC	0.07	0.258	0.443	19.94
İroko	Epoksi Reçine	Kontrol	0	0.057	-	HI	0.06	0.009	0.197	97.31
		TiO ₂	1	0.116	↑103.51	FGH	0.02	0.099	0.135	13.33
			2	0.073	↑28.07	HI	0.02	0.049	0.113	23.27
		SiO ₂	1	0.158	↑177.19	FG	0.04	0.109	0.231	25.88
			2	0.053	↓7.02	HI	0.02	0.033	0.089	33.28
	Akrilik	Kontrol	0	0.361	-	B	0.11	0.205	0.499	30.47
		TiO ₂	1	0.153	↓57.62	FG	0.02	0.125	0.192	14.91
			2	0.169	↓53.19	EF	0.03	0.121	0.195	15.71
		SiO ₂	1	0.365	↑1.11	B	0.17	0.250	0.808	45.72

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç

Çizelge 4.16'ya göre, kızılçam–akrilik vernik kombinasyonunda kontrol grubunun R_a değeri 0.173 μm olarak belirlenmiştir. Verniğe %1 TiO₂ ilavesiyle R_a 0.162 μm 'ye düşerek yüzey pürüzlülüğü %6.36 azalmış; ancak %2 TiO₂ katkısında 0.226 μm 'ye yükselmiş ve %30.64 artış gözlenmiştir. SiO₂ katkısı yüzey pürüzlülüğünü daha belirgin biçimde artırmış; %1 SiO₂'de R_a 0.502 μm (%190.17 artış), %2 SiO₂'de ise 0.280 μm (%61.85 artış) olmuştur. Kızılçam–epoksi vernik sisteminde kontrol grubunun R_a değeri 0.038 μm ile en düşük değeri göstermiştir. %1 ve %2 TiO₂ katkılarında R_a sırasıyla 0.069 μm (%81,58 artış) ve 0.055 μm (%44,74 artış) değerlerine ulaşmıştır. SiO₂ katkısı etkisini daha güçlü göstermiş; %1 SiO₂'de R_a 0.100 μm (%163,16 artış), %2 SiO₂'de ise 0.179 μm (%371.05 artış) olmuştur.

İroko–akrilik vernik kombinasyonunda kontrol grubunun R_a değeri 0.361 μm 'dir. TiO₂ katkıları yüzeyi belirgin biçimde iyileştirmiş; %1 ve %2 katkılarda R_a sırasıyla 0.153 μm (%57.62 azalma) ve 0.169 μm (%53.19 azalma) olarak ölçülmüştür. SiO₂ katkısı ise

kararsız bir etki göstermiş; %1 SiO₂'de Ra 0.365 µm'ye (%1.11 artış), %2 SiO₂'de 0.334 µm'ye (%7.48 azalma) değişmiştir. İroko–epoksi vernik sisteminde kontrol grubunun Ra değeri 0.057 µm'dir. %1 TiO₂ katkısında 0.116 µm'ye (%103.51 artış), %2 TiO₂'de 0.073 µm'ye (%28.07 artış) yükselmiştir. SiO₂ katkısında ise %1 oranında 0.158 µm'ye (%177.19 artış) artarken, %2 oranında 0.053 µm'ye (%7.02 azalma) düşmüştür (Çizelge 4.16).



Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülüğü analiz R_a

Şekil 4.8'de göre yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri, ağaç türü, vernik tipi ve nano katkı oranına bağlı olarak önemli değişimler göstermiştir. Kızılçam örneklerinde akrilik vernikle %1 TiO₂ katkısı yüzey pürüzlülüğünü azaltırken, katkı oranının %2'ye çıkarılması pürüzlülüğü artırmıştır. SiO₂ katkısı ise genel olarak yüzey pürüzlülüğünü belirgin biçimde yükseltmiştir. Epoksi verniklerde kontrol grubunda en düşük Ra değerleri elde edilmiştir; ancak hem TiO₂ hem de SiO₂ katkıları bu değeri artırmıştır. İroko örneklerinde TiO₂ katkısı özellikle akrilik vernik sisteminde yüzeyin daha düzgün hale gelmesini sağlamış, SiO₂ katkısı ise düzensiz bir etki göstermiştir. Genel olarak TiO₂ katkısının düşük oranlarda yüzey kalitesini iyileştirdiği, SiO₂'nin ise pürüzlülüğü artırma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.17’de verilen varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türünün R_q değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p>0.05$). Buna karşılık, vernik türü ve nano katkı oranı faktörleri R_q üzerinde anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p<0.05$). Ayrıca, ağaç türü–katkı oranı, vernik türü–katkı oranı ve üçlü etkileşim de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek bir faktörden değil, vernik tipi, katkı oranı ve ağaç türünün birlikte etkisinden etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.17. R_q parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p\leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	0.006	1	0.006	0.569	0.451
Vernik Türü (B)	2.389	1	2.389	213.866	0.000*
Etkileşim (AB)	0.010	1	0.010	0.882	0.349
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	0.973	4	0.243	21.780	0.000*
Etkileşim (AC)	0.448	4	0.112	10.021	0.000*
Etkileşim (BC)	0.420	4	0.105	9.393	0.000*
Etkileşim (ABC)	0.485	4	0.121	10.861	0.000*
Hata	2.011	180	0.011		
Toplam	18.646	200			
Düzeltilmiş Toplam	6.743	199			

Çizelge 4.4’deki sonuçlar, ağaç türü, vernik tipi ve nano katkı maddesinin yüzey pürüzlülüğü ve homojenlik üzerindeki etkilerini göstermektedir. Kızılçam–akrilik vernik kombinasyonunda kontrol grubunun R_q değeri $1.078\ \mu\text{m}$ olup TiO_2 katkısı (%1 ve %2) ile sırasıyla 0.826 ve $0.840\ \mu\text{m}$ ’ye düşmüş, pürüzlülük %22–23 oranında azalmıştır. SiO_2 katkısı ise R_q değerini %87.20 (%1 katkı) ve %9.83 (%2 katkı) artırmıştır. Homojenlik açısından TiO_2 ’nin %2 katkısı daha dengeli bir dağılım sağlarken, SiO_2 katkısı homojenliği bozmuştur. Kızılçam–epoksi vernik sisteminde kontrol grubunun R_q değeri $0.358\ \mu\text{m}$ olup en düşük pürüzlülük bu grupta elde edilmiştir. %1 ve %2 TiO_2 katkısı pürüzlülüğü sırasıyla 0.520 ve $0.539\ \mu\text{m}$ ’ye çıkarırken, %1 SiO_2 katkısı R_q ’yı $0.314\ \mu\text{m}$ ’ye düşürmüş, %2 katkıda ise $0.891\ \mu\text{m}$ ’ye yükselmiştir. Elde edilen bulgular, epoksi sistemine ilave edilen TiO_2 ’nin yüzey pürüzlülüğünü artırarak daha düzensiz bir yüzey yapısına neden olduğunu; SiO_2 katkısının ise düşük oranlarda sistem içerisinde daha homojen bir dağılım sağlayarak yüzeyin daha düzgün ve dengeli bir yapı kazanmasına katkıda bulunduğunu, ancak katkı oranı yükseldikçe parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi nedeniyle yüzeyde düzensizliklerin artmasına ve pürüzlülük değerlerinin belirgin şekilde yükselmesine yol açtığını göstermektedir.

İroko–akrilik vernik kombinasyonunda kontrol grubunun R_q değeri $2.642 \mu\text{m}$ olup TiO_2 katkısı ile %1 ve %2’de sırasıyla 0.623 ve $0.518 \mu\text{m}$ ’ye düşerek yüzeyin belirgin şekilde düzleştiği gözlenmiştir. SiO_2 katkısı ise katkı oranına bağlı dalgalanma göstererek %1 katkıda $1.148 \mu\text{m}$, %2 katkıda $1.470 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

İroko–epoksi vernik sisteminde kontrol grubunun R_q değeri $0.526 \mu\text{m}$ olup %1 ve %2 TiO_2 katkısı ile sırasıyla 0.707 ve $0.701 \mu\text{m}$ ’ye yükselmiştir. SiO_2 katkısı ise %1’de R_q ’yı $0.589 \mu\text{m}$ ’ye çıkarırken, %2 katkıda $0.303 \mu\text{m}$ ’ye düşürerek yüzeyi düzleştirmiştir (Çizelge 4.4).

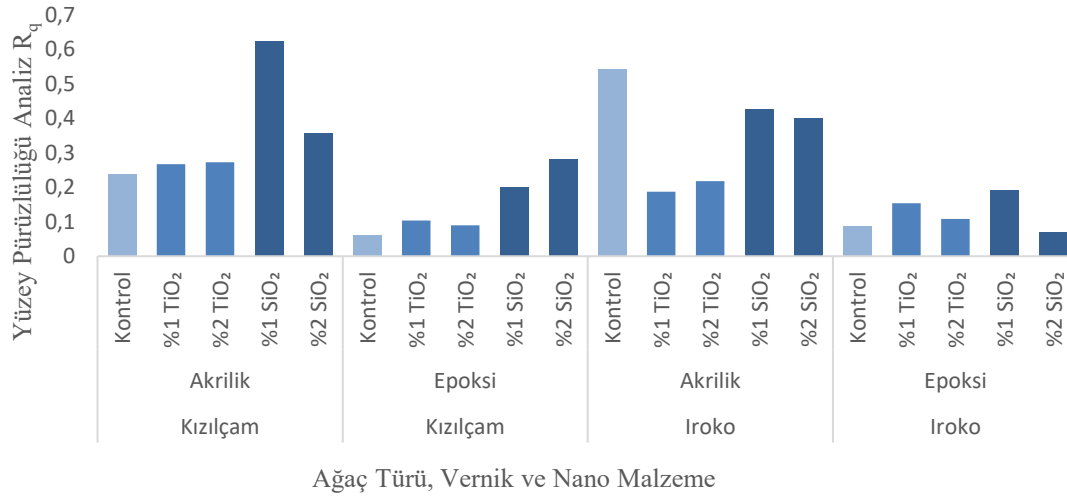
Çizelge 4.18. R_q parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	0.239		DE	0.05	0.160	0.311	20.8446
			1	0.267	↑11.72	CD	0.12	0.167	0.497	38.231023
		TiO_2	2	0.273	↑14.23	CD	0.06	0.192	0.401	31.023
			1	0.624	↑161.09	A*	0.15	0.424	0.864	51.2734
		SiO_2	2	0.357	↑49.37	BC	0.10	0.187	0.482	34.34
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	0.061	-	H**	0.02	0.033	0.082	34

Iroko	Akrilik	TiO ₂	1	0.104	↑70.49	FGH	0.05	0.037	0.191	.48488	
			2	0.090	↑47.54	GH	0.03	0.069	0.137	.95288	
			1	0.201	↑229.51	DEF	0.25	0.072	0.910	.596125	
		SiO ₂	2	0.281	↑360.66	CD	0.10	0.142	0.442	.533606	
			Kontrol	0	0.541	-	A	0.16	0.270	0.816	.300713
			1	0.187	↓65.43	DEFG	0.03	0.153	0.235	.63233	
	Epoksi Reçine	TiO ₂	2	0.218	↓59.70	DE	0.05	0.140	0.304	.5049	
			1	0.427	↓21.07	B	0.21	0.290	0.999	.2019	
		SiO ₂	2	0.401	↓25.88	B	0.08	0.316	0.550	.9631	
			Kontrol	0	0.088	-	GH	0.09	0.018	0.325	.1491
	TiO ₂	1	0.154	↑75.00	EFGH	0.02	0.134	0.192	.212		

								7
								4
								4
								8
	2	0.108	↑22.73	FGH	0.05	0.073	0.248	.
								1
								3
								2
	1	0.191	↑117.05	DEFG	0.04	0.144	0.253	1
								.
								4
SiO ₂								5
								3
								0
	2	0.070	↓20.45	H	0.02	0.043	0.117	.
								6
								1

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç



Şekil 4.9 Yüzey pürüzlülüğü analiz R_q

Şekil 4.9’da ki sonuçlar, ağaç türü, vernik tipi ve nano katkı maddesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini göstermektedir. Kızılçam örneklerinde akrilik vernikte TiO₂ katkısı (1–2%) pürüzlülüğü azaltırken, SiO₂ katkısı önemli ölçüde artırmıştır. Epoksi vernikli kızılçamda kontrol grubu en düşük R_q değerini gösterirken, TiO₂ katkısı pürüzlülüğü artırmış, SiO₂ düşük oranda yüzeyi düzleştirmiş ancak yüksek oranda pürüzlülüğü belirgin biçimde yükseltmiştir. İroko örneklerinde akrilik vernik ile TiO₂ katkısı yüzeyi belirgin şekilde düzleştirirken, SiO₂ etkisi dalgalı olmuştur. Epoksi vernikli iroko yüzeyinde TiO₂ katkısı pürüzlülüğü artırmış, SiO₂ katkısı katkı oranına bağlı olarak hem artırıcı hem de azaltıcı etki göstermiştir. Genel olarak, TiO₂ katkısı özellikle akrilik sistemlerde yüzeyi düzleştirici ve gözenekleri doldurucu etki gösterirken, SiO₂ katkısı

pürüzlülüğü artırıcı eğilim taşımış, homojenlik ve varyasyon katsayısı değerleri katkı maddelerinin dağılımının yüzey davranışını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur.

Çizelge 4.19’da sunulan varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türünün R_z değerleri üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı ($p>0.05$) görülmektedir. Buna karşılık, vernik türü ve nano katkı oranı faktörleri R_z üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar yaratmıştır ($p<0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ nano katkı oranı, vernik türü $\times$ nano katkı oranı ve üçlü etkileşim (ağaç $\times$ vernik $\times$ katkı oranı) faktörleri de yüzey pürüzlülüğünde anlamlı değişiklikler meydana getirmiştir. Bu bulgular, yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde tek başına ağaç türünün etkisinin sınırlı olduğunu, asıl belirleyicinin vernik tipi ve nano katkı maddesinin formülasyonu ile oranı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.19. R_z parametresine ait varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Ağaç Türü (A)	0.006	1	0.006	0.569	0.451
Vernik Türü (B)	2.389	1	2.389	213.866	0.000*
Etkileşim (AB)	0.010	1	0.010	0.882	0.349
Nano Katkı Maddesi Oranı (C)	0.973	4	0.243	21.780	0.000*
Etkileşim (AC)	0.448	4	0.112	10.021	0.000*
Etkileşim (BC)	0.420	4	0.105	9.393	0.000*
Etkileşim (ABC)	0.485	4	0.121	10.861	0.000*
Hata	2.011	180	0.011		
Toplam	18.646	200			
Düzeltilmiş Toplam	6.743	199			

Çizelge 4.20’deki R_z parametresi sonuçları, ağaç türü, vernik tipi ve nano katkı maddesinin yüzey tepe ve çukur derinliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Kızılçam–akrilik vernik kombinasyonunda kontrol grubunun R_z değeri 1.078 μm olup TiO_2 katkısı (%1 ve %2) ile sırasıyla 0.826 ve 0.840 μm ’ye düşerek pürüzlülükte %22–23 oranında azalma sağlamıştır. SiO_2 katkısı ise R_z değerini %87.20 (%1 katkı) ve %9.83 (%2 katkı) artırmıştır.

Homojenlik açısından TiO_2 ’nin %2 katkısı daha dengeli bir dağılım sunarken, SiO_2 katkısı homojenliği bozmuştur. Kızılçam–epoksi vernik sisteminde kontrol grubunun R_z değeri 0.358 μm olup en düşük tepe-çukur derinliği bu grupta elde edilmiştir. %1 ve %2 TiO_2 katkısı R_z değerini sırasıyla 0.520 ve 0.539 μm ’ye yükseltmiş, %1 SiO_2 katkısı 0.314

μm 'ye düşürmüş, %2 katkıda ise 0.891 μm 'ye çıkarak yüzeyi daha pürüzlü hâle getirmiştir.

İroko–akrilik vernikte kontrol Rz 2.642 μm iken, TiO_2 katkısı (%1 ve %2) yüzeyi belirgin şekilde düzleştirerek 0.623 ve 0.518 μm 'ye düşürdü. SiO_2 katkısı ise dalgalı bir etki gösterdi (0.1: 1.148 μm , 0.2: 1.470 μm). İroko–epoksi sisteminde kontrol 0.526 μm iken, TiO_2 katkısı Rz'yi artırdı (0.707 ve 0.701 μm), SiO_2 katkısı %1'de 0.589 μm 'ye çıkarıp %2'de 0.303 μm 'ye düşürdü. Genel olarak TiO_2 katkısı özellikle akrilik sistemlerde yüzeyi düzleştirici ve gözenekleri doldurucu etki gösterirken, SiO_2 katkısı pürüzlülüğü artırma eğilimindedir.

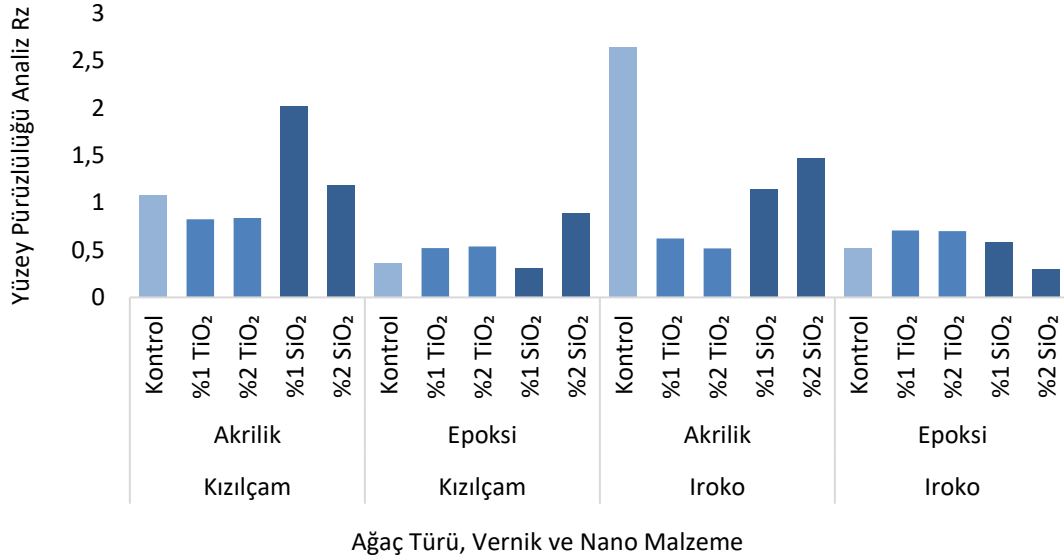
Çizelge 4.20. R_z parametresine ait ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Vernik Türü	Nano Katkı Maddesi	Katkı Oranı (%)	Ortalama	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
Kızılçam	Akrilik	Kontrol	0	1.078	-	CDE	0.29	0.763	1.716	27.1854
			1	0.826	↓23.38	DEF	0.45	0.447	1.656	62.1704
		TiO_2	2	0.840	↓22.08	DEF	0.14	0.595	1.023	04.3227
			1	2.018	↑87.20	B	0.67	1.228	3.527	92.7211
	Epoksi Reçine	SiO_2	2	1.184	↑9.83	CD	0.26	0.696	1.528	92.1196
			Kontrol	0.358	-	G	0.16	0.156	0.671	44.4
		Kontrol	0	0.358	-	G	0.16	0.156	0.671	44.4
			1	0.358	-	G	0.16	0.156	0.671	44.4

Iroko	Akrilik	TiO ₂	1	0.520	↑45.25	FG	0.29	0.160	1.027	8356.22493839.5971.725.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			2	0.539	↑50.56	FG	0.27	0.259	0.971	3839.3839.5971.725.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
		SiO ₂	1	0.314	↓12.29	G	0.12	0.175	0.551	3839.3839.5971.725.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			2	0.891	↑148.88	DEF	0.63	0.396	2.079	3839.3839.5971.725.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
	Epoksi Reçine	Kontrol	0	2.642	-	A*	0.67	1.457	3.592	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			1	0.623	↓76.42	FG	0.20	0.422	1.140	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
		TiO ₂	2	0.518	↓80.39	FG	0.12	0.358	0.762	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			1	1.148	↓56.55	CD	0.60	0.755	2.819	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
	Epoksi Reçine	SiO ₂	2	1.470	↓44.36	C	0.48	0.855	2.151	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			0	0.526	-	FG	0.57	0.132	2.059	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
		TiO ₂	1	0.707	↑34.41	EFG	0.15	0.503	0.844	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91
			0	0.526	-	FG	0.57	0.132	2.059	25.2932.1823.952.832.107.810.8220.91

								8
								3
		2	0.701	↑33.27	EFG	0.59	0.332	2.272
								6
								4
								6
		1	0.589	↑11.98	FG	0.41	0.323	1.708
								9
								3
								6
	SiO ₂							3
		2	0.303	↓42.40	G**	0.12	0.143	0.584
								8
								4
								0

Kontrol: Bu deney grubu örneklerine herhangi bir nano katkı maddesi katılmamıştır. Ölçüm Sayısı: 10, Homojenlik grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç



Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü analiz R_z

Şekil 4.10'daki R_z sonuçları, ağaç türü, vernik tipi ve nano katkı maddesinin yüzey tepeçukur derinliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Kızılçam örneklerinde akrilik vernikle TiO₂ katkısı (1–2%) R_z değerini azaltarak yüzeyi düzleştirirken, SiO₂ katkısı pürüzlülüğü artırmıştır. Epoksi vernikli kızılçamda kontrol grubu en düşük R_z değerini gösterirken, TiO₂ katkısı pürüzlülüğü artırmış, SiO₂ katkısı düşük oranda yüzeyi düzleştirmiş ancak yüksek oranda pürüzlülüğü belirgin biçimde yükseltmiştir. İroko örneklerinde akrilik vernik ile TiO₂ katkısı yüzeyi belirgin şekilde düzleştirirken, SiO₂ katkısı katkı oranına bağlı olarak dalgalanma göstermiştir. Epoksi vernikli iroko yüzeyinde TiO₂ katkısı pürüzlülüğü artırmış, SiO₂ katkısı ise düşük oranlarda artırıcı,

yüksek oranlarda azaltıcı etki yapmıştır. Genel olarak, TiO_2 katkısı özellikle akrilik sistemlerde gözenek doldurucu ve yüzeyi düzleştirici etki gösterirken, SiO_2 katkısı pürüzlülüğü artırıcı eğilim taşımış ve homojenlik ile varyasyon katsayısı değerleri katkı maddelerinin dağılımının yüzey davranışını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada TiO_2 ve SiO_2 nanoparçacık katkılarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, literatürdeki benzer araştırmalarla karşılaştırıldığında genel olarak uyumlu sonuçlar vermiştir. TiO_2 katkısının düşük oranlarda yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve daha düzgün bir film yapısı sağladığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, Ünal (2020)'nin TiO_2 'nin yüzeyde homojen dağılım göstererek gözenekleri doldurduğu ve pürüzlülüğü düşürdüğü yönündeki sonuçlarıyla örtüşmektedir. Buna karşılık, SiO_2 katkısının özellikle yüksek oranlarda pürüzlülük değerlerini artırdığı belirlenmiş; bu durum Karaman (2019)'ın SiO_2 'nin küresel morfolojisi nedeniyle vernik filminde mikro-yüzey düzensizliklerine yol açtığı ve yüzey düzgünlüğünü azalttığı yönündeki bulgularıyla paralellik göstermektedir. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla benzer eğilimler sergilemiş ve nanoparçacık türü ile oranının yüzey topografyası üzerinde belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymuştur.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin Kızılçam (*Pinus brutia*) ve İroko (*Milicia excelsa*) ahşap türleri üzerine uygulanmış akrilik ve epoksi esaslı vernik kaplamaların renk, parlaklık ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerindeki etkilerini nicel olarak incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı nano katkı tiplerinin ve oranlarının ahşap

yüzeylerin optik ve fiziksel niteliklerine olan etkisini belirlemek, böylece kaplama performansını iyileştirmeye yönelik öneriler geliştirmektir.

Varyans analizi (ANOVA) ve çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre, renk parametrelerinin (L^* , a^* , b^* , C^* , h°) tümünde ağaç türü, vernik türü, nano katkı tipi ve katkı oranı değişkenlerinin anlamlı düzeyde etkili olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$).

L^* (açıklık) değerleri incelendiğinde, TiO_2 katkısının özellikle %2 oranında uygulandığında yüzey açıklığını artırarak daha parlak bir görünüm sağladığı, SiO_2 katkısının ise yüzeyi koyulaştırdığı tespit edilmiştir. Bu etki, TiO_2 'nin yüksek optik yansıtıcılığıyla ilişkilidir. İroko örneklerinde TiO_2 'nin beyazlatıcı etkisi özellikle belirgin olup, koyu yüzeylerin açık tonlara dönüşmesini sağlamıştır.

a^* (kırmızı-yeşil eksen) parametresi bakımından, Kızılçam örneklerinde TiO_2 katkısının düşük oranlarda kırmızılığı artırdığı, yüksek oranlarda ise yeşilimsi bir tona kayma oluşturduğu görülmüştür. SiO_2 katkısının etkisi ise daha düzensiz bir yapı sergilemiş; düşük oranlarda renk doygunluğunu azaltırken yüksek oranlarda kırmızılığı artırmıştır. İroko yüzeylerinde TiO_2 katkısı kırmızılığı baskılamış ve yüzeyi daha nötr renklere yönlendirmiştir.

b^* (sarı-mavi eksen) sonuçları, TiO_2 'nin sarı tonları bastırarak yüzeyi nötr ve soğuk tonlara yönlendirdiğini, SiO_2 'nin ise sıcak renk karakterini koruduğunu ortaya koymuştur. Özellikle İroko örneklerinde TiO_2 katkısı b^* değerini negatif yönde etkileyerek mavileştirici bir etki göstermiştir.

C^* (renk doygunluğu) analizleri, TiO_2 katkısının yüzey doygunluğunu düşürdüğünü, dolayısıyla mat bir görünüm oluşturduğunu; SiO_2 katkısının ise özellikle epoksi vernikli sistemlerde renk doygunluğunu koruyarak yüzeyin canlılığını artırdığını göstermiştir. h° (renk tonu açısı) sonuçları da, TiO_2 katkısının renk tonunu sıcak tonlardan soğuk tonlara kaydardığını, SiO_2 katkısının ise renk stabilitesini desteklediğini ortaya koymuştur.

Farklı oranlarda (%1 ve %2) TiO_2 ve SiO_2 katkılarının epoksi ve akrilik vernik sistemlerinde yüzey parlaklığı üzerindeki etkileri incelendiğinde, ağaç türü, vernik türü ve nano katkı oranının parlaklık üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Ayrıca, ağaç türü $\times$ vernik türü, ağaç türü $\times$ katkı oranı ve vernik türü $\times$ katkı oranı etkileşimlerinin de parlaklık üzerinde anlamlı farklar meydana getirdiği görülmüştür.

Sonuçlar, en belirleyici faktörün vernik türü olduğunu göstermiştir. Epoksi esaslı vernikler, akrilik esaslara göre daha yüksek parlaklık değerleri sağlamıştır. Bu durum, epoksi sistemlerin daha yoğun film oluşturma kapasitesi ve ışık yansıtma özelliklerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

TiO_2 katkısı, tüm kombinasyonlarda SiO_2 'ye kıyasla daha yüksek parlaklık değerleri sağlamıştır. Özellikle %2 TiO_2 katkısında hem Kızılçam hem de İroko yüzeylerinde belirgin parlaklık artışı gözlenmiştir. SiO_2 katkısı ise düşük oranlarda (%1) epoksi sistemlerinde yüzey düzgünlüğünü artırarak parlaklığı olumlu etkilerken, yüksek oranlarda (%2) partikül birikimi nedeniyle ışığın düzensiz saçılmasına ve parlaklık azalmasına yol açmıştır.

Ağaç türü bakımından, Kızılçam yüzeylerinde TiO_2 katkısının parlaklığı artırdığı, SiO_2 katkısının ise düşük oranlarda yüzeyde matlık eğilimi oluşturduğu tespit edilmiştir. İroko örneklerinde ise doğal yağlı ve gözenekli yüzey yapısı nedeniyle nanoparçacık katkılarının etkisi sınırlı kalmıştır. Bu durum, vernik filminin yüzeye nüfuz etme derecesi ve ahşabın doğal özellikleriyle ilişkilidir.

Parlaklık ölçümleri lif yönüne göre de farklılık göstermiştir. Liflere dik yönde yapılan ölçümlerde yüzey pürüzlülüğü optik yansımayı doğrudan etkilemiş; liflere paralel yönde yapılan ölçümlerde ise vernik ve katkı etkileri daha belirgin hale gelmiştir. Bu bulgular, yüzey düzgünlüğü, film bütünlüğü ve optik yansıtma kapasitesi arasındaki güçlü ilişkiyi doğrulamaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rq, Rz) parametreleri üzerinde vernik türü ve nano katkı oranı faktörlerinin istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). TiO_2 katkısının düşük oranlarda (%1) yüzey pürüzlülüğünü azalttığı, SiO_2 katkısının ise çoğu durumda pürüzlülüğü artırdığı saptanmıştır. Özellikle %2 oranında SiO_2 katkısının akrilik vernikle birlikte kullanıldığında topaklanmaya neden olduğu ve film bütünlüğünü bozduğu gözlenmiştir. Buna karşın, TiO_2 katkısı film yapısını stabilize ederek yüzeyi daha düzgün ve homojen hâle getirmiştir.

Epoksi vernik sistemleri, her üç pürüzlülük parametresinde de akrilik sistemlere kıyasla daha düşük değerler sağlamıştır. Bu durum, epoksinin yoğun film oluşturma ve yüzey bütünlüğünü koruma kapasitesiyle açıklanmaktadır. Kızılçam yüzeylerinde epoksi + TiO_2 kombinasyonu en düşük pürüzlülük değerlerini verirken, İroko yüzeylerinde doğal yağlı yapı nedeniyle katkıların etkisi daha değişken olmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TiO_2 nanoparçacıkları renk açıklığını artırıcı, doygunluğu azaltıcı ve soğuk tonlara yönlendirici bir etki sergilerken; SiO_2 nanoparçacıkları renk canlılığını ve sıcak ton dengesini koruyucu bir katkı maddesi olarak öne çıkmıştır. TiO_2 'nin özellikle koyu renkli türlerde (İroko gibi) beyazlatıcı etkisi belirginken, SiO_2 renk stabilitesi bakımından daha avantajlı bulunmuştur.

Çalışma sonuçları, nano katkı tipinin ve oranının ahşap yüzey kaplamalarının optik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. TiO_2 katkılı sistemler, özellikle epoksi esaslı verniklerle birlikte kullanıldığında hem yüksek parlaklık hem de düşük pürüzlülük değerleri sağlamıştır. SiO_2 katkısı ise daha çok yüzey homojenliği ve renk stabilitesinin korunmasına katkı sağlamış, ancak yüksek oranlarda yüzey matlaşmasına yol açmıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda:

- Parlak ve yüksek yansıtıcı yüzeylerin istendiği mobilya ve dekoratif panel uygulamalarında, epoksi esaslı ve %2 TiO_2 katkılı vernik sistemlerinin kullanılması önerilmektedir.

- Daha doğal veya mat yüzey görünümü hedeflenen uygulamalarda ise, akrilik esaslı ve düşük oranlı (%1) SiO₂ katkılı sistemler uygun bir alternatif sunmaktadır.
- İroko gibi yağlı yapıya sahip türlerde vernik öncesi yüzey hazırlığının (yağ giderme veya astarlama) yapılması, film bütünlüğünü ve parlaklığı artırabilir.
- Kızılçam gibi düşük yoğunluklu türlerde TiO₂ katkısı yüzey kalitesini belirgin biçimde iyileştirmiştir.

Bu çalışma, nano katkılı verniklerin ahşap yüzey mühendisliğinde etkin biçimde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ancak gelecekteki araştırmalarda yalnızca parlaklık ve renk değil, sertlik, çizilme ve aşınma direnci, UV dayanımı ve yaşlandırma davranışı gibi performans kriterlerinin de incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca TiO₂–ZnO veya SiO₂–Al₂O₃ gibi hibrit nano sistemlerin değerlendirilmesi hem optik hem mekanik özelliklerin birlikte iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, TiO₂ nanoparçacıkları özellikle optik performans ve film düzgünlüğü bakımından, SiO₂ nanoparçacıkları ise yüzey homojenliği ve renk stabilitesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bulgular, nanoteknolojik katkıların ahşap yüzey kaplama teknolojilerinde sürdürülebilir, estetik ve dayanıklı çözümler geliştirilmesi yönünde güçlü bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- ASTM International. (1976). ASTM D1413–76: Odun koruyucuların laboratuvar toprak-blok kültürleri ile test edilmesi standardı. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (1998). ASTM D3023: Ahşap ürünlere fabrikada uygulanmış kaplamaların leke ve reaktiflere karşı dirençlerinin belirlenmesi standardı. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM D2244: Aletsel olarak ölçülen renk koordinatlarından renk toleransları ve farklarının hesaplanması standardı. West Conshohocken, PA: ASTM International
- Atılğan, A., Burdurlu, E., Atar, M., & Yaşar, S. (2024). Effect of the mechanical densification process in wood material on the surface adhesion strength of varnishes. *BioResources*, 19(4), 797. <https://www.proquest.com/openview/5a067c3bb3db0e350f99a0afacf162f9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=5038271>
- Atılğan, A., & Evcin, O. (2025). Modification of wood surfaces with nanomaterials having hydrophobic and hydrophilic properties. *Politeknik Dergisi*, 1–1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1665234>
- Atılğan, A., Sofuoğlu, S. D. (2023a). The effect of hot and cold check tests on surface roughness and glossiness in varnished wood material. *Drvna Industrija*, 74(4), 395–406. <https://hrcak.srce.hr/311415>
- Atılğan, A., & Sofuoğlu, S. D. (2023b). Utjecaj testa vruće i hladne provjere na hrapavost i sjaj površine lakiranog drva. *Drvna Industrija*, 74(4), 395–406. <https://doi.org/10.5552/drvind.2023.0085>
- Atılğan, A., Tan, H., Ulusoy, H., & Peker, H. (2018). Dye of waste tea extract with mordant-varnish and the effect of color changes on wood. *International Journal of Ecosystems & Ecology Sciences*, 8(2). <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=22244980&AN=132763932>

- Atılğan, A., Ulusoy, H., Tan, H., & Peker, H. (2018). Ahşapta ekolojik boya kullanımı ve yüzey pürüzlülüğü. *Journal of Polytechnic*, 21(3), 553–558. <https://doi.org/10.2339/politeknik.417748>
- Bak, M. (2018). Possibilities of using nanotechnology in wood colour protection. *Óbuda University e-Bulletin*, 8(2), 29–33.
- Danischewski, J. (2023). Color transferability from solution to solid using silica-coated silver nanoparticles. *Frontiers in Chemistry*, 11, Article 9910289. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9910289/>
- Diebold, M., Kwoka, R., & Mukoda, D. (2013, Şubat). TiO₂—Scattering optimization and not-in-kind opacity alternatives [Conference paper]. DuPont Titanium Technologies. https://www.paint.org/wp-content/uploads/2021/09/TiO2_Feb-2013.pdf
- Fufa, S. M., Jelle, B. P., & Hovde, P. J. (2013). Effects of TiO₂ and clay nanoparticles loading on weathering performance of coated wood. *Progress in Organic Coatings*, 76(10), 1425–1429.
- Güller, B. (2020). Kızılcıam’da (*Pinus brutia* Ten.) odun yoğunluğunun X-ray yoğunluk ölçer ile belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/195756>
- Hernandez, V., Morales, C., Sagredo, N., Perez-Gonzalez, G., Romero, R., & Contreras, D. (2020). Radical species production and color change behavior of wood surfaces treated with suppressed photoactivity and photoactive TiO₂ nanoparticles. *Coatings*, 10(11), 1033. <https://doi.org/10.3390/coatings10111033>
- Jasmani, L., Rusli, R., Khadiran, T., & diğerleri. (2020). Odun bazlı ürünler endüstrisinde nanoteknolojinin uygulamaları: Bir inceleme. *Nanoscale Research Letters*, 15(207). <https://doi.org/10.1186/s11671-020-03438-2>
- Kalinowski, M., Chilmon, K., Kuziak, J., Łukowski, P., & Jackiewicz-Rek, W. (2025). Photocatalytically induced degradation of nano-TiO₂-modified paint coatings under low-radiation conditions. *Coatings*, 15(3), 281. <https://doi.org/10.3390/coatings15030281>

- Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi. (t.y.). *Pinus brutia* Ten. – Kızılcım. https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormanmuhendisligi_27442.pdf
- Karamanoğlu, M. (2020). Nanoparçacıklar ile modifiye edilmiş su bazlı verniklerin ısı işlem uygulanmış bazı ağaç malzemelerde UV yaşlandırma etkisine karşı direncinin belirlenmesi [Doktora tezi, Kastamonu Üniversitesi].
- Liu, H., Xiong, H., Chang, Y., Xu, J., Xu, C., & Liu, Y. (2022). Fabrication of superhydrophobic coating based on waterborne silicone-modified polyurethane dispersion and silica nanoparticles. *Polymers*, 15(1), 22. <https://doi.org/10.3390/polym15010022>
- Miklečić, J., Turkulin, H., & Jirouš-Rajković, V. (2017). Weathering performance of surface of thermally modified wood finished with nanoparticles-modified waterborne polyacrylate coatings. *Applied Surface Science*, 408, 103–109.
- Miklečić, J., Zeljko, M., Lučić Blagojević, S., & Jirouš-Rajković, V. (2024). The effect of polyacrylate emulsion coating with unmodified and modified nano-TiO₂ on weathering resistance of untreated and heat-treated wood. *Polymers*, 16(4), 511. <https://doi.org/10.3390/polym16040511>
- Moya, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Vega-Baudrit, J., & Puente-Urbina, A. (2017). Effects of adding TiO₂ nanoparticles to a water-based varnish for wood applied to nine tropical woods of Costa Rica exposed to natural and accelerated weathering. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(1), 141–152.
- Orman Genel Müdürlüğü. (t.y.). Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.). <https://www.ogm.gov.tr/tr/yararli-bilgiler/haftanin-agaci/kizilcam>
- Pacheco Pinilla, C. M., Bustos, C., Reyes, G., Oviedo, C., Fernández Pérez, A., Elso, M., & Rojas, O. J. (2021). Nanocomposite additive of SiO₂/TiO₂/nanocellulose on waterborne coating formulations for mechanical and aesthetic properties stability on wood. *Materials Today Communications*, 29, 102990. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102990>
- Papadopoulos, A. N., Bikiaris, D. N., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2019). Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties: A review. *Nanomaterials*, 9(4), 607. <https://doi.org/10.3390/nano9040607>

- Papadopoulos, A. N., & Taghiyari, H. R. (2019). Innovative wood surface treatments based on nanotechnology. *Coatings*, 9(12), 866. <https://doi.org/10.3390/coatings9120866>
- Rahayu, I., Darmawan, W., Nawawi, D. S., Prihatini, E., İsmail, R., Laksono, G. D., & Martha, V. R. (2023). Surface modification of fast-growing wood with a titanium-dioxide-based nanocoating to improve weathering resistance. *Coatings*, 13(11), 1924. <https://doi.org/10.3390/coatings13111924>
- Rassam, G., Abdi, Y., & Abdi, A. (2011). Deposition of TiO₂ nanoparticles on wood surfaces for UV and moisture protection. *Journal of Experimental Nanoscience*, 7(4), 468–476. <https://doi.org/10.1080/17458080.2010.538086>
- Spear, M. J., Curling, S. F., Dimitriou, A., & Ormondroyd, G. A. (2021). Review of functional treatments for modified wood. *Coatings*, 11(3), 327. <https://doi.org/10.3390/coatings11030327>
- Svora, P., Svorová Pawełkowicz, S., Ecorchard, P., Plocek, J., Schieberová, A., Prošek, Z., Ptáček, P., Pošta, J., Targowski, P., Kuklík, P., & Jakubec, I. (2022). Study of interactions between titanium dioxide coating and wood cell wall ultrastructure. *Nanomaterials*, 12(15), 2678. <https://doi.org/10.3390/nano12152678>
- T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2017, Nisan). Türkiye nanoteknoloji stratejisi ve eylem planı (2017–2018). Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü. https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/2017-2018_Nanoteknoloji-Stratejisi-ve-Eylem-Plani.pdf
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (1999). TS 6212 EN ISO 4288: Geometrik ürün özellikleri (GPS) – Yüzey dokusu: Profil yöntemi – Yüzey dokusunun değerlendirilmesi için kurallar ve prosedürler. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2002). TS 3129: Silindirik beton numunelerin yarmada çekme dayanımının tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2005). TS 2495 EN ISO 3274: Geometrik ürün özellikleri (GPS) – Yüzey dokusu: Profil yöntemi – Temaslı (iğneli) cihazların nominal özellikleri. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2016). TS EN 338: Yapısal kereste – Dayanım sınıfları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO). (2009). ISO 2470-1: Kağıt, karton ve hamurlar – Dağınık mavi yansıma faktörünün (ISO parlaklığı) ölçülmesi – Bölüm 1. Cenevre: ISO.
- Ulay, G., Akter, M., Çakıcıer, N., Peker, H., Ayata, U., & Atılgan, A. (2025). The effect of weathering on color and glossiness properties of polyurethane-modified water-based varnish layers applied to thermally treated ash wood. *BioResources*, 20(3), 7555–7573. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.7555-7573>
- Ulusoy, H., Özcan, M., Perçin, O., Atılgan, A., & Peker, H. (2018). Effects of upper surface (nanotechnology varnish) materials on technological properties of unimpregnated/impregnated wood. *SETSCI Conference Proceedings*, 2, 104. https://www.set-science.com/index.php/manage/uploads/ISAS2018_005/SETSCI_ISAS2018_005_0098.pdf
- Ünal, T. (2016). Nanopartiküller ile modifiye edilen verniklerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi].
- Yıldırım, T. (2021). Nanoteknoloji öğretimi üzerine yapılan çalışmaların uluslararası literatür kapsamında tematik incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Dergisi*, 52, 77–96.
- Yunlin, F., Yinyou, M., & Mengji, Q. (2014). Method for improving surface properties of wood by using silicon dioxide (China Patent CN102581900B). <https://patents.google.com/patent/CN102581900B/en>
- Zheng, R., Tshabalala, M. A., Li, Q., & Wang, H. (2016). Photocatalytic degradation of wood coated with a combination of rutile TiO₂ nanostructures and low-surface free-energy materials. *BioResources*, 11(1), 2393–2402. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.2393-2402>
- Zhou, S., Wu, L., Xiong, M., & He, Q. (2008). Dispersion and UV–VIS properties of nanoparticles in coatings. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 25(4), 417–433. <https://doi.org/10.1081/DIS-200025688>

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.grupagac.com.tr/iroko-kerestesi-ithalati/> 09.09.2025
- 2- <https://www.woodworkerssource.com/lumber/iroko-african-teak.html> 09.09.2025
- 3- <https://www.ramsaytimber.co.uk/hardwoods/african-far-eastern-hardwoods/iroko> 09.09.2025
- 4- <https://k-timbers.com/iroko-wood-properties-characteristics-uses/> 09.09.2025
- 5- https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/TechSheets/Chudnoff/African/new_pdf_files/Chlorophoraexcelsa.pdf 09.09.2025
- 6- <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/Africa/IROKO%202023.pdf> 09.09.2025
- 7- <https://tosla.com/blog/nanoteknoloji-nedir-ve-kullanim-alanlari-nelerdir> 09.09.2025
- 8- <https://www.scribd.com/document/841448380/Bolum-1> 09.09.2025
- 9- <https://www.scribd.com/document/841448380/Bolum-1> 09.09.2025
- 10- <https://tosla.com/blog/nanoteknoloji-nedir-ve-kullanim-alanlari-nelerdir> 09.10.2025
- 11- <https://tuzenkimya.com/urunlerimiz/titanyum-dioksit> 09.10.2025
- 12- <https://www.nanokar.com.tr/blog/titanyum-dioksit-tio2-ozellikleri-uretimi-ve-uygulamalari> 10.10.2025
- 13- <https://tr.silica-factory.com/> 10.10.2025
- 14- <https://tr.dinuofrp.com/info/types-and-development-trends-of-epoxy-resin-cu-86328148.html> 10.10.2025
- 15- <https://tr.ohans.com/improving-uv-resistance-and-preventing-yellowing-in-epoxy-resin-formulations/> 11.10.2025
- 16- <https://www.baumerk.com/tr/blog/endustriyel-tesislerde-epoksi-zemin-kaplama> 11.10.2025