



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TiO₂ KATKILI ANTİBAKTERİYEL KULAK KALIPLARININ 3D
BASKIYLA ÜRETİLMESİ: BİYOLOJİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

MUHAMMED FURKAN KARACA

BİYOMALZEME VE DOKU MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Şanlıurfa
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TiO₂ KATKILI ANTİBAKTERİYEL KULAK KALIPLARININ 3D
BASKIYLA ÜRETİLMESİ: BİYOLOJİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

MUHAMMED FURKAN KARACA

**BİYOMALZEME VE DOKU MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ**

**Şanlıurfa
2026**

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve başarıyla gerçekleştirilmesi sürecinde, her türlü akademik desteği ve olanaklarıyla yanımda olan, değerli bilgi ve tecrübeleriyle akademik hayatıma yön veren Sayın Hocam Prof. Dr. Bülent AKTAŞ'a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Lisans eğitimimden yüksek lisans eğitimimin her aşamasında; tezimin proje ve yazım sürecinde destek ve katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Gökhan DEMİRCAN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Abuzer Açıkğöz ve Arş. Gör. Nergiz Ülker'e; gerçekleştirilen antibakteriyel analizlerdeki değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. Ebru UYAR'a teşekkür ederim. Ayrıca analizlerde sağladıkları imkân ve destekler için Harran Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne; yüksek lisans eğitimim süresince bana destek olan Doç. Dr. Hatice AKTAŞ ve Prof. Dr. Şerife YALÇIN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca desteklerini ve fedakârlıklarını hiçbir zaman esirgemeyen babam Zeynel KARACA, annem Pakize KARACA ve kardeşlerim Lütfullah ile Talha KARACA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı, tez sürecinde bana ilham kaynağı olan ve rahmetle andığım büyükbabam Lütfi KARACA'nın aziz hatırasına ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. İşitme Cihazlarında Kulak Kalıplarının Rolü	3
1.2. Üç Boyutlu Baskı Teknolojileri	5
1.2.1. FDM Yazıcılarla Baskı	5
1.2.2. LCD Yazıcılarla Baskı	5
1.2.3. DLP Yazıcılarla Baskı	6
1.2.4. Diğer 3B Baskı Teknolojileri	7
1.3. Kulak Kalıplarının Yapısı ve Gereksinimleri	7
1.3.1. Medikal Polimerler ve Biyouyumluluk Kriterleri	8
1.3.2. İşitme Cihazı Komponentleri	9
1.4. Kulak İçi Protezlerde Kullanılan Polimerik Malzemeler	13
1.4.1. Ultraviyole ile Sertleşen Reçineler	13
1.4.2. Diğer Fotopolimer Türleri	13
1.4.3. Medikal Kullanımda Polimerlerin Avantajları ve Sınırlamaları	14
1.5. Titanyum Dioksitin Biyomedikal Uygulamalardaki Önemi	14
1.5.1. Antibakteriyel Özellikleri	14
1.5.2. Biyouyumluluk ve Toksikite Değerlendirmeleri	16
1.6. Üç Boyutlu Baskı Teknolojisinin Kişiyeye Özel Medikal Üretimdeki Yeri	17
1.6.1. DLP Baskı Teknolojisi	17
1.6.2. Avantajlar ve Kısıtlamalar	19
1.6.3. Medikal Uygulama Örnekleri	19
1.7. İşitme Kaybı ve Medikal Önemi	21
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	23
3. GEREÇ VE YÖNTEM	26
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	26
3.2. DLP Tabanlı 3B Baskı için TiO ₂ Katkılı Fotopolimer Reçine Karışımlarının Hazırlanması	26
3.3. DLP Tabanlı 3B Yazıcı ile Numune Üretimi	29
3.4. Fiziksel, Yapısal, Termal ve Kimyasal Karakterizasyon	31
3.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	32
3.4.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi	32
3.4.3. Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA)	32
3.4.4. İndüktif Eşleşmiş Plazma (ICP) Analizi	33
3.5. Çekme Testi ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	34
3.6. Biyolojik Testler	34
3.6.1. İn vitro sitotoksosite analizi	34
3.6.2. Antibakteriyel Testler	36
3.7. İstatistiksel Değerlendirme	36
4. BULGULAR	38
4.1. TiO ₂ Katkısının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	38
4.2. FT-IR Analizi Bulguları	39
4.3. TG/DTA Analizi Bulguları	43
4.4. Numunelerin Çekme Davranışına Ait Mekanik Bulgular	45
4.5. TiO ₂ katkılı kulak kalıbı numunelerinin iyon salım davranışı	48
4.6. Titanyum katkılı kulak kalıplarının in vitro sitotoksosite bulguları	50
4.7. Antibakteriyel Test Bulguları	53

5. TARTIŞMA	57
5.1. TiO ₂ Katkısına Bağlı Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi	57
5.2. FT-IR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	57
5.3. TG/DTA Analizinin Değerlendirilmesi	58
5.4. TiO ₂ Katkısının Numunelerin Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi	59
5.5. İyon Salımı ve Sitotoksosite Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61
5.6. Bakteriyel Adezyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	63
6. SONUÇLAR	64
7. ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	74

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TiO₂ KATKILI ANTİBAKTERİYEL KULAK KALIPLARININ 3D BASKIYLA ÜRETİLMESİ: BİYOLOJİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MUHAMMED FURKAN KARACA

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMALZEME VE DOKU MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışman: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ

Yıl: 2026, Sayfa : 74

İşitme kaybı, bireylerin iletişim becerilerini, sosyal etkileşimlerini ve yaşam kalitesini doğrudan etkileyen yaygın bir sağlık sorunudur. İşitme cihazlarının klinik başarısı yalnızca elektronik bileşenlerin performansına değil, aynı zamanda kulak kanalı ile temas eden kulak kalıplarının anatomik uyumuna, mekanik özelliklerine ve biyolojik güvenliğine de bağlıdır. Uzun süreli kullanım sırasında kulak kanalının nemli yapısı, mikrobiyal kolonizasyon ve biyofilm oluşumu için elverişli bir ortam oluşturarak enfeksiyon riskini artırabilmektedir. Bu bağlamda, antibakteriyel özelliklere sahip, kişiye özel kulak kalıplarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, Dijital Işık İşleme (DLP) tabanlı üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak titanyum dioksit (TiO₂) nanopartikül katkı, antibakteriyel ve biyouyumlu kulak kalıplarının üretilmesi ve bu yapıların yapısal, mekanik, termal ve biyolojik özelliklerinin kapsamlı biçimde incelenmesidir. Çalışma kapsamında anataz fazında ve ortalama 38 nm partikül boyutuna sahip TiO₂ nanopartikülleri, UV ile kürlenebilen biyouyumlu fotopolimer reçineye ağırlıkça %0–%3 aralığında ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar manyetik karıştırıcıda homojenize edilmiş ve DLP tabanlı 3B yazıcı ile kulak kalıbı ve test numuneleri üretilmiştir. Yapısal analizlerde SEM–EDX sonuçları, düşük ve orta TiO₂ katkı oranlarında nanopartiküllerin matris içerisinde nispeten homojen dağıldığını göstermiştir. FTIR analizleri, TiO₂ katkısına rağmen polimer matrisin kimyasal iskeletinin korunduğunu ve Ti–O/Ti–O–Ti titreşim bantlarının yapıya başarıyla entegre olduğunu ortaya koymuştur. TG/DTA analizlerinde tüm numunelerin çok kademeli termal bozunma davranışı sergilediği belirlenmiş; özellikle %0.25–%1 TiO₂ katkıli numunelerde ara bozunma sıcaklıklarının saf numuneye göre yaklaşık 10–14 °C daha yüksek değerlere kaydığı gözlenmiştir. Mekanik testlerde, saf numuneye kıyasla çekme dayanımı %0.75 TiO₂ katkıli numunede yaklaşık %9.2 oranında artarken, elastisite modülü %1 TiO₂ katkıli numunede yaklaşık %17.7 oranında yükselmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ise saf numunede 2.131 µm iken, %0.75 TiO₂ katkıli numunede 0.313 µm seviyesine kadar düşmüştür. Biyolojik test sonuçları, TiO₂ katkıli kulak kalıplarının antibakteriyel ve antibiyofilm etkinlik gösterdiğini ve uygun katkı oranlarında sitotoksik etki oluşturmadığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu çalışma, DLP tabanlı 3B baskı teknolojisi ile TiO₂ katkıli antibakteriyel kulak kalıplarının başarıyla üretilebileceğini ve özellikle %0.5–%0.75 TiO₂ katkı aralığının mekanik, termal ve biyolojik performans açısından optimum olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, uzun dönem klinik kullanım ve in vivo değerlendirmelerin yapılması önerilmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Üç boyutlu baskı, Antibakteriyel özellikler, kulak kalıbı, TiO₂ Nanopartikülleri, Dijital Işık İşleme(DLP)

ABSTRACT

MASTER THESIS

3D PRINTING OF TiO₂-DOPED ANTIBACTERIAL EAR MOLDS: INVESTIGATION OF THEIR BIOLOGICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES

MUHAMMED FURKAN KARACA

HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
DEPARTMENT OF BIOMATERIALS AND TISSUE ENGINEERING

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year: 2026, Page : 74

Hearing loss is a widespread health problem that directly affects individuals' communication abilities, social interactions, and overall quality of life. The clinical success of hearing aids depends not only on the performance of electronic components but also on the anatomical compatibility, mechanical properties, and biological safety of ear molds that are in direct contact with the ear canal. During long-term use, the humid environment of the ear canal promotes microbial colonization and biofilm formation, increasing the risk of infection. In this context, the development of personalized ear molds with antibacterial properties is of great importance. The aim of this master's thesis is to fabricate titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle-reinforced, antibacterial, and biocompatible ear molds using Digital Light Processing (DLP)-based three-dimensional (3D) printing technology and to comprehensively investigate their structural, mechanical, thermal, and biological properties. Within the scope of the study, anatase-phase TiO₂ nanoparticles with an average particle size of approximately 38 nm were incorporated into a biocompatible UV-curable photopolymer resin at weight ratios ranging from 0 to 3 wt%. The prepared resin-nanoparticle mixtures were homogenized using a magnetic stirrer and subsequently printed as ear molds and standard test specimens via a DLP-based 3D printer. Structural analyses using SEM-EDX revealed a relatively homogeneous distribution of TiO₂ nanoparticles within the polymer matrix at low and intermediate filler contents. FTIR analysis confirmed that the chemical backbone of the photopolymer matrix was preserved after TiO₂ incorporation, while characteristic Ti-O and Ti-O-Ti vibration bands verified the successful integration of nanoparticles into the structure. TG/DTA analyses demonstrated a multi-step thermal degradation behavior for all samples; notably, samples containing 0.25–1 wt% TiO₂ exhibited a shift of intermediate degradation temperatures to higher values by approximately 10–14 °C compared to the neat resin. Mechanical testing showed that the tensile strength increased by approximately 9.2% for samples containing 0.75 wt% TiO₂, while the elastic modulus increased by approximately 17.7% for samples with 1 wt% TiO₂ relative to the neat material. Surface roughness measurements indicated a significant reduction in roughness, decreasing from 2.131 µm for the neat resin to 0.313 µm for samples containing 0.75 wt% TiO₂. Biological evaluations demonstrated that TiO₂-reinforced ear molds exhibited antibacterial and antibiofilm activity without inducing cytotoxic effects at appropriate nanoparticle concentrations. In conclusion, this study demonstrates that DLP-based 3D printing is a viable and effective approach for producing TiO₂-reinforced antibacterial ear molds, and that a TiO₂ content in the range of 0.5–0.75 wt% provides an optimal balance between mechanical performance, thermal stability, and biological functionality. Future studies are recommended to focus on long-term clinical performance and in vivo evaluations.

KEYWORDS: 3D printing, Antibacterial properties, ear mold, TiO₂ Nanoparticles, Digital Light Processing (DLP)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.5. FDM teknolojisinin çalışma prensibi.	5
Şekil 1.6. LCD tabanlı vat fotopolimerizasyon sisteminin şematik gösterimi.	6
Şekil 1.7. DLP yazıcı ve kütleme.	7
Şekil 1.2. İşitme cihazının temel bileşenleri ve akustik sinyal iletim zinciri (Dillo, 2012).	10
Şekil 1.3. Dijital işitme cihazlarında DSP tabanlı sinyal işleme akış şeması.	11
Şekil 1.4. Kulak kalıbı ile dış kulak kanalı arasındaki akustik sızdırmazlık ve ses iletim prensibi.	12
Şekil 1.1. TiO ₂ nanopartiküllerinin fotokatalitik sürece dayalı antibakteriyel etkisi.	15
Şekil 3.1. Titanyum dioksit (TiO ₂) nanopartiküllerinin belirlenen oranlara göre hassas terazi kullanılarak tartılması.	28
Şekil 3.2. Alias Ear Mold UV reçinenin karıştırma kabına aktarılması.	28
Şekil 3.3. Reçine ile TiO ₂ nanopartiküllerinin manyetik karıştırıcıda karıştırılması.	29
Şekil 3.4. DLP tipi 3B yazıcı.	30
Şekil 3.5. Kulak kalıbı modellerinin 3D yazıcıda aşağıdan yukarı tekniğiyle basılması.	31
Şekil 3.6. Time TR 200 model profilmetre cihazı.	32
Şekil 4.1. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.	39
Şekil 4.2. Katkısız ve Titanyum katkılı örneklerin FTIR grafiği	40
Şekil 4.3. Temel çizgi düzeltmesi uygulanmış FTIR spektrumlarının Gauss ayrıştırması sonucunda belirlenen C=C ve C=O bantlarına ait spektrumlar.	42
Şekil 4.4. Saf ve farklı oranlarda TiO ₂ katkılanmış kulak kalıbı örneklerine ait TG/DTA/DTG analizleri: (a) Saf, (b) %0.25 TiO ₂ , (c) %0.50 TiO ₂ , (d) %0.75 TiO ₂ , (e) %1 TiO ₂ , (f) %2 TiO ₂ ve (g) %3 TiO ₂	45
Şekil 4.5. Numunelere ait çekme testlerinden elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri.	46
Şekil 4.6. TiO ₂ katkısı ile kulak kalıbı malzemesinin elastisite modülündeki değişim.	48
Şekil 4.7. Kulak kalıbı numunelerinin yapay ter çözeltisi içerisinde 14 gün süreyle ekstraksiyonu sonrası salınan titanyum iyonu konsantrasyonları (ppb). *: Katkısız numuneye (Saf) göre istatistiksel bakımdan anlamlı fark (p < 0.05).	50
Şekil 4.8. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 24 saatlik ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksosite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark (p < 0.05).	52
Şekil 4.9. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 14 günlük ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksosite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark (p < 0.05).	53
Şekil 4.10. Numunelerin yüzeyine tutunan S. aureus ATCC 25923 için canlı sayım sonuçları (A) ve bu sonuçlara ait petri görüntüleri (B). 3 bağımsız denemenin ortalaması ve standart sapmaları verilmiştir.	55
Şekil 4.11. Numunelerin yüzeyine tutunan P. aeruginosa ATCC 25923 için canlı sayım sonuçları (A) ve bu sonuçlara ait petri görüntüleri (B). 3 bağımsız denemenin ortalaması ve standart sapmaları verilmiştir.	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.2. Medikal uygulamalarda kullanılan başlıca 3B baskı teknolojilerinin karşılaştırılması	7
Çizelge 1.1. İşitme cihazı bileşenlerinin işlevleri ve performans etkileri.	12
Çizelge 3.1. Kulak kalıbı için hazırlanan karışımların kompozisyonları.	27
Çizelge 4.1. Temel çizgi düzeltmesi uygulanmış FTIR spektrumlarının Gauss ayrıştırması sonucunda belirlenen C=C ve C=O bantlarına ait entegre alan oranları.	43
Çizelge 4.2. Saf ve TiO ₂ Katkılı numunelere ait DTG maksimum bozunma sıcaklıkları.	43
Çizelge 4.3. Numunelere ait çekme testi sonuçları.	47
Çizelge 4.4. Kulak kalıbı numunelerinin yapay ter çözeltisi içerisinde 1 gün ve 14 gün süreyle ekstraksiyonu sonrası salınan titanyum iyonu konsantrasyonları (ppb). *: Katkısız numuneye (Saf) göre istatistiksel bakımdan anlamlı fark (p < 0.05).	49
Çizelge 4.5. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 24 saat ve 14 günlük ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksosite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark (p < 0.05).	51
Çizelge 4.6. Saf ve TiO ₂ katkılı örneklere tutunan test bakterilerinin canlı sayım sonuçları.	53

SİMGELER

ϵ	birim şekil değiştirme
A	Kesit alanı
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet
GPa	Gigapaskal
kob	Koloni oluşturan birim
kPa	kilopascal
MPa	megapascal
nm	Nanometre
ppb	Milyarda Bir Birim
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
TiO₂	Titanyum dioksit
λ	Dalga Boyu
μm	Mikrometre
σ	Gerilme

KISALTMALAR

3D	3 Boyutlu
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATCC	American Type Culture Collection
DLP	Dijital Işık İşleme
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EDX	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FDA	Amerika Gıda ve İlaç Dairesi
FTIR	Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
ROS	Reaktif oksijen türleri
SBF	Simüle Vücut Sıvısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STL	Standart Mozaikleme Dili
uv	ultraviyole

1. GİRİŞ

İşitme kaybı, bireylerin iletişim yeteneklerini, sosyal etkileşimlerini ve yaşam kalitesini doğrudan etkileyen yaygın bir sağlık sorunudur. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre dünya genelinde yüz milyonlarca birey klinik olarak anlamlı işitme kaybı yaşamaktadır ve bu durumun küresel hastalık yükü giderek artmaktadır (World Health Organization (WHO), 2021). İşitme kaybının rehabilitasyonunda kullanılan işitme cihazları, bireyin günlük yaşam aktivitelerine katılımını artırmakta ve psikososyal iyilik hâline önemli katkılar sağlamaktadır (Kramer vd., 2021). Bununla birlikte, işitme cihazlarının klinik başarısı yalnızca elektronik donanımın performansına değil, cihazın kulak kanalı ile olan mekanik ve biyolojik etkileşimine de doğrudan bağlıdır (Dillon, 2012).

İşitme cihazlarının kulak kanalıyla temas eden en önemli bileşeni kulak kalıplarıdır. Kulak kalıpları, güçlendirilmiş ses sinyallerinin kulak kanalına kontrollü biçimde iletilmesini sağlarken aynı zamanda akustik sızdırmazlık ve kullanıcı konforu açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Kulak kalıbının geometrik uyumu ve kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, cihaz kazancı, geri besleme kontrolü ve uzun süreli kullanım toleransı üzerinde belirleyici etkilere sahiptir (Kuk vd., 2009; Dillon, 2012). Bununla birlikte, kulak kanalının nemli ve sıcak yapısı ile kulak kalıplarının uzun süreli kullanımı, mikroorganizma kolonizasyonu için elverişli bir mikro ortam oluşturmaktadır. Bu durum, işitme cihazı kullanıcılarında bakteriyel veya fungal dış kulak yolu enfeksiyonlarının ortaya çıkma riskini artırmaktadır (Brook, 2012; Orji vd., 2014).

Geleneksel kulak kalıbı üretim yöntemlerinde çoğunlukla silikon veya akrilik esaslı polimerler kullanılmakta ve bu kalıplar manuel ölçüm ve döküm teknikleriyle hazırlanmaktadır. Her ne kadar bu malzemeler biyoyumlu kabul edilse de, üretim sürecindeki sınırlı geometrik hassasiyet ve yüzey pürüzlülüğünün yeterince kontrol edilememesi, bakteriyel adezyon ve biyofilm oluşumu açısından dezavantaj oluşturmaktadır (Kuk vd., 2009). Ayrıca standart üretim yaklaşımları, bireysel anatomik farklılıkları tam olarak yansıtamamakta ve bu durum kullanıcı konforunun azalmasına yol açabilmektedir (Dillon, 2012).

Son yıllarda üç boyutlu (3B) baskı teknolojilerinin medikal alanda yaygınlaşması, kulak kalıplarının üretiminde kişiye özel ve yüksek hassasiyetli çözümler sunmuştur. Dijital tarama, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve eklemeli imalat süreçlerinin entegrasyonu sayesinde, kulak kanalının anatomik yapısı yüksek doğrulukla modellenilmekte ve bireye özgü kulak kalıpları

üretilebilmektedir (Ventola, 2014; Yan vd., 2018). Bu yaklaşım, hem akustik performansın iyileştirilmesine hem de mekanik uyumun artırılmasına olanak tanımaktadır.

Vat fotopolimerizasyon temelli 3B baskı teknolojileri arasında yer alan Dijital Işık İşleme (DLP) yöntemi, yüksek çözünürlük, düzgün yüzey kalitesi ve kısa üretim süresi gibi avantajlarıyla medikal uygulamalarda öne çıkmaktadır. DLP teknolojisinde sıvı fotopolimer reçine, dijital projektör aracılığıyla katman bazında eş zamanlı olarak kürlenmekte ve bu sayede karmaşık geometriler mikron seviyesinde hassasiyetle üretilebilmektedir (Melchels vd., 2010; Quan vd., 2020). Bu özellikler, kulak kanalı gibi dar ve anatomik açıdan karmaşık bölgeler için üretilen kulak kalıplarında büyük önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, yalnızca geometrik uyumun sağlanması, kulak kalıplarına bağlı enfeksiyon riskinin ortadan kaldırılması için yeterli değildir. Bu nedenle son yıllarda kulak kalıplarında ve diğer medikal cihazlarda antibakteriyel özellik kazandırılmış malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artmıştır (González-Henríquez vd., 2019). Metal ve metal oksit nanopartikülleri, geniş spektrumlu antibakteriyel etkileri nedeniyle bu alanda yoğun ilgi görmektedir (Vivero-López vd., 2021).

Titanyum dioksit (TiO_2), yüksek kimyasal kararlılığı, biyouyumluluğu ve fotokatalitik özellikleri sayesinde antibakteriyel uygulamalar için öne çıkan bir metal oksittir. Uygun dalga boyundaki ışık altında reaktif oksijen türleri (ROS) üretebilen TiO_2 nanopartikülleri, bakteri hücre zarında oksidatif hasar oluşturarak mikroorganizmaların çoğalmasını baskılayabilmektedir (Foster vd., 2011; Fujishima vd., 2008). Bu mekanizma, protein oksidasyonu, membran bütünlüğünün bozulması ve DNA hasarı ile sonuçlanmaktadır (Hashimoto vd., 2005).

TiO_2 nanopartiküllerinin polimer matrisler içerisine kontrollü oranlarda eklenmesi, malzemeye antibakteriyel ve antibiyofilm özellikler kazandırırken, mekanik ve yapısal özelliklerin de korunmasını mümkün kılmaktadır. Ancak nanopartikül katkısının fotopolimer reçinelerin kürlenme davranışı ve optik geçirgenliği üzerindeki etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Jafari vd., 2020). Bu nedenle katkı oranının optimize edilmesi ve homojen dağılımın sağlanması büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, DLP tabanlı 3B baskı teknolojisi kullanılarak TiO_2 nanopartikül katkılı, kişiye özel antibakteriyel kulak kalıplarının üretilmesi ve

bu yapıların yapısal, mekanik ve biyolojik özelliklerinin kapsamlı biçimde incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde TiO₂ katkılı polimer kompozitler ve 3B baskı ile üretilen medikal yapılar ayrı ayrı incelenmiş olmakla birlikte, DLP teknolojisi kullanılarak TiO₂ katkılı antibakteriyel kulak kalıplarının sistematik biçimde üretildiği ve çok yönlü olarak değerlendirildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır (Melchels vd., 2010; Quan vd., 2020; Yan vd., 2018). Bu yönüyle mevcut çalışma, işitme cihazı bileşenlerinde enfeksiyon riskinin azaltılmasına yönelik özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

1.1. İşitme Cihazlarında Kulak Kalıplarının Rolü

Kulak kalıpları, işitme cihazlarının kulak kanalı ile etkileşimini sağlayan ve cihaz performansının klinik etkinliğinde belirleyici rol oynayan temel yapısal bileşenlerdir. Amplifiye edilen sesin kontrollü ve verimli biçimde kulak kanalına iletilmesi, büyük ölçüde kulak kalıbının geometrik tasarımına ve kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır. Kulak kanalıyla yeterli uyum göstermeyen kalıplar, ses sızıntısına neden olarak cihaz kazancını düşürebilmekte ve geri besleme (feedback) problemlerinin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir (Dillon, 2012).

Kulak kalıbının sağladığı akustik sızdırmazlık düzeyi, özellikle düşük frekans yanıtı ve genel ses kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Yetersiz sızdırmazlık durumunda, güçlendirilmiş ses dalgaları kulak kanalından dışarı kaçarak cihaz mikrofona geri ulaşabilmekte ve osilasyon oluşturarak istenmeyen geri besleme seslerine neden olmaktadır. Bu nedenle kulak kalıbının şekli, vent açıklıkları ve kulak kanalına temas eden yüzey alanı, akustik performansı doğrudan etkileyen temel tasarım parametreleri arasında yer almaktadır (Kuk vd., 2009).

Kulak kalıplarında kullanılan malzemenin mekanik davranışı, kullanıcı konforu ve uzun süreli kullanım toleransı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Akrilik esaslı sert kalıplar, boyutsal kararlılıkları sayesinde hassas ölçülerde üretilebilmekte ve rezonans özelliklerinin korunmasının istendiği durumlarda avantaj sağlamaktadır. Buna karşılık silikon esaslı yumuşak kalıplar, elastik yapıları sayesinde kulak kanalındaki basınç noktalarını azaltarak daha yüksek konfor sunabilmektedir. Ancak bu tür yumuşak malzemelerin, yeterli sızdırmazlık elde edebilmek için daha fazla temas kuvveti gerektirebilmesi, bazı kullanıcılar tarafından tıkanıklık hissi olarak algılanabilmektedir (Dillon, 2012; Kuk vd., 2009).

Kullanıcı memnuniyetinin artırılmasında kulak kalıplarının kişiye özel

olarak üretilmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel ölçüm ve döküm yöntemleriyle üretilen standart kulak kalıpları, bireysel anatomik farklılıkları sınırlı düzeyde yansıtabilmektedir. Buna karşın dijital kulak tarama teknolojileriyle elde edilen üç boyutlu anatomik verilerin üretim sürecine doğrudan aktarılması, kulak kanalının morfolojik özelliklerinin yüksek doğrulukla kopyalanmasına olanak tanımaktadır (Ventola, 2014). Bu yaklaşım, kulak kalıplarının hem mekanik uyumunu hem de akustik etkinliğini artırmaktadır.

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri ile üretilen kulak kalıplarının, geleneksel yöntemlerle üretilen kalıplara kıyasla daha homojen yüzey özellikleri ve daha iyi anatomik uyum sunduğu bildirilmektedir. Kişiselleştirilmiş üretimin sağladığı bu avantajlar, uzun süreli kullanımda mekanik iritasyonun ve akustik kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Yan vd., 2018).

Kulak kalıplarının uzun süreli kullanımında karşılaşılan temel sorunlardan biri, kulak kanalında oluşan mikroiklim değişiklikleridir. Kulak kanalının kısmen veya tamamen kapatılması, nemin hapsolmesine ve lokal sıcaklığın artmasına neden olmakta; bu durum bakteri ve mantarların çoğalması için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Klinik çalışmalar, işitme cihazı kullanıcılarında dış kulak yolu enfeksiyonlarının daha sık görülebildiğini ve bu enfeksiyonların sıklıkla *Staphylococcus aureus* ve *Candida* türleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Orji vd., 2014; Brook., 2012).

Bu nedenle kulak kalıplarında kullanılan malzemelerin biyouyumlu olmasının yanı sıra mikrobiyal adezyonu ve biyofilm oluşumunu azaltacak özellikler taşıması gerekmektedir. Fotokatalitik özellik gösteren titanyum dioksit (TiO_2) nanopartikülleri, ultraviyole ışık altında reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek mikroorganizmaların hücre zarında oksidatif hasar oluşturmada ve biyofilm gelişimini baskılayabilmektedir (Foster vd., 2011). TiO_2 nanopartiküllerinin polimer matrisler içerisine kontrollü oranlarda eklenmesi, kulak kalıbı yüzeyinde mikrobiyal yükün azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu tür katkıların kulak kalıbının elastik ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilememesi büyük önem taşımaktadır; zira mekanik parametrelerde meydana gelebilecek belirgin değişimler, kulak kalıbının kulak kanalındaki davranışını ve buna bağlı olarak akustik performansı doğrudan etkileyebilmektedir (Zore vd., 2022).

Sonuç olarak, kulak kalıpları işitme cihazlarının klinik başarısında merkezi bir role sahiptir. Kişiye özel 3D baskı teknolojileriyle üretilen, biyouyumlu

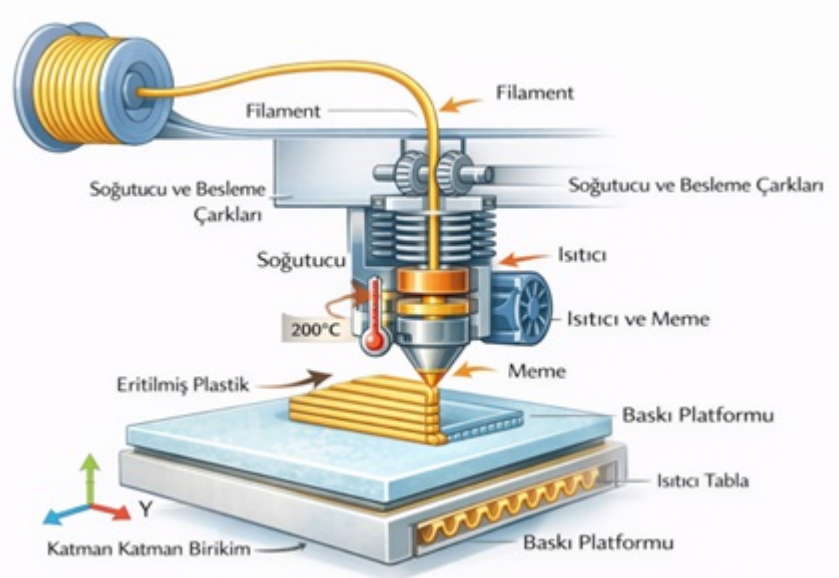
ve antimikrobiyal özelliklerle desteklenmiş kulak kalıpları; akustik performans, kullanıcı konforu ve hijyen açısından mevcut sınırlamaların aşılmasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu bağlamda kulak kalıbı tasarımında yalnızca iç kanal uyumunun değil, aynı zamanda dış yapı ergonomisinin ve yüzey özelliklerinin de bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

1.2. Üç Boyutlu Baskı Teknolojileri

Üç boyutlu (3B) baskı teknolojileri, dijital ortamda tasarlanan modellerin katmanlı üretim yaklaşımıyla fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan ileri imalat yöntemleridir. Medikal cihaz üretiminde bu teknolojiler; kişiye özel tasarım, hızlı prototipleme ve yüksek geometrik doğruluk gibi avantajlar sunmaktadır (Gebler vd., 2014; Ngo vd., 2018). Özellikle kulak kalıpları gibi anatomik uyumun kritik olduğu uygulamalarda, 3B baskı yöntemleri geleneksel üretim tekniklerine kıyasla önemli üstünlükler sağlamaktadır.

1.2.1. FDM Yazıcılarla Baskı

FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisi, termoplastik filamentlerin eritilerek nozul aracılığıyla katman katman serilmesi esasına dayanır (Şekil 1.5). Baskı süreci, üç boyutlu CAD modelinin dilimleme yazılımı ile katmanlara ayrılması ve her katman için ekstrüzyon yollarının oluşturulmasıyla başlar (Turner vd., 2014).

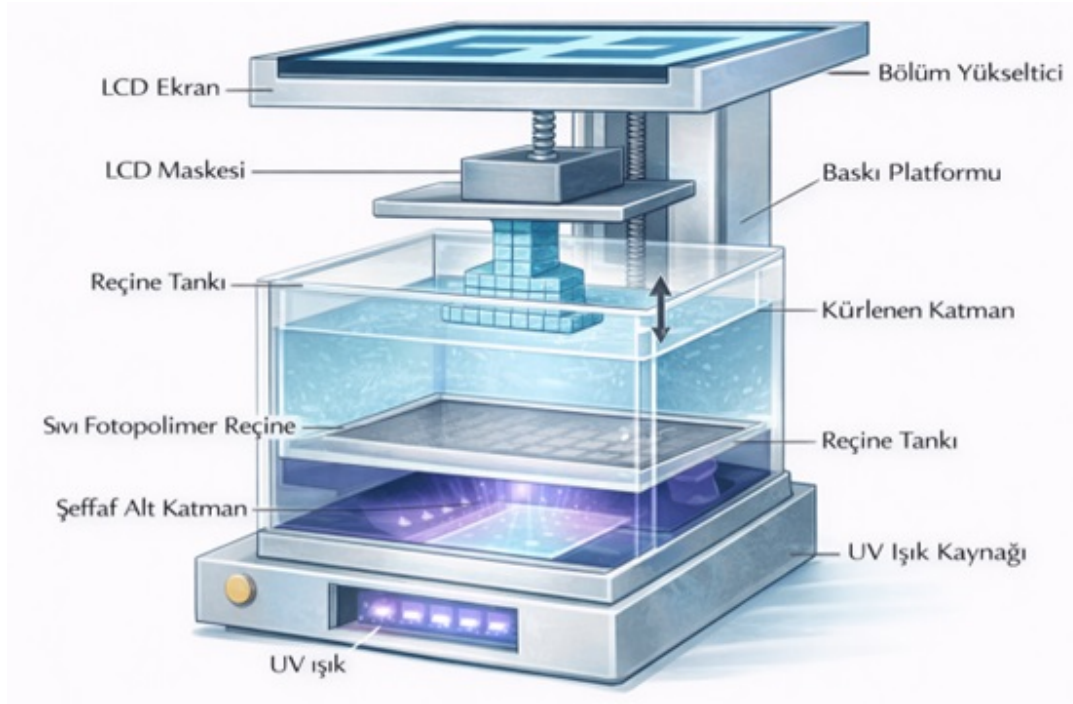


Şekil 1.5. FDM teknolojisinin çalışma prensibi.

1.2.2. LCD Yazıcılarla Baskı

LCD tabanlı 3B baskı sistemleri, vat fotopolimerizasyon teknikleri içerisinde maske tabanlı bir yöntem olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.6). Bu yöntemde sıvı fotopolimer reçine, LCD ekran üzerinden oluşturulan dijital maske yardımıyla UV ışığa maruz bırakılarak katman bazında kürlenir (Quan vd., 2020).

Yüksek çözünürlüklü LCD paneller sayesinde kulak kanalı gibi karmaşık ve dar geometriler milimetre altı hassasiyetle üretilebilmektedir (Salih vd., 2023). Ancak ışık şiddetinin sınırlı olması, pozlama süresi ve fotobaşlatıcı konsantrasyonunun dikkatle optimize edilmesini gerektirir



Şekil 1.6. LCD tabanlı vat fotopolimerizasyon sisteminin şematik gösterimi.

1.2.3. DLP Yazıcılarla Baskı

DLP (Digital Light Processing) teknolojisi, sıvı fotopolimer reçinenin dijital projektör aracılığıyla tüm katmanın aynı anda pozlanmasıyla kürlenmesine dayanır (Şekil 1.7). Bu yaklaşım, yüksek üretim hızı ve homojen yüzey kalitesi sağlamaktadır (Melchels vd., 2010).



Şekil 1.7. DLP yazıcı ve kürleme.

1.2.4. Diğer 3B Baskı Teknolojileri

FDM ve vat fotopolimerizasyon tabanlı sistemlerin yanı sıra, selektif lazer sinterleme (SLS) gibi yöntemler de medikal üretimde yer almaktadır. SLS, toz hâlindeki malzemelerin lazer yardımıyla sinterlenmesi esasına dayanır ve destek yapısına ihtiyaç duyulmaması sayesinde geometrik serbestlik sağlar (Ngo vd., 2018). Ancak yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması, kulak kalıpları gibi hassas uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır. Tablo 1.2’de Medikal uygulamalarda kullanılan başlıca 3B baskı teknolojilerinin karşılaştırılması sunulmaktadır.

Çizelge 1.2. Medikal uygulamalarda kullanılan başlıca 3B baskı teknolojilerinin karşılaştırılması

Baskı Teknolojisi	Kullanılan Malzeme	Çözünürlük	Yüzey Kalitesi	Kulak Kalıbına Uygunluk
FDM	Termoplastik (PLA, TPU)	Orta	Orta–Düşük	Sınırlı
LCD	Fotopolimer reçine	Yüksek	Yüksek	Uygun
DLP	Fotopolimer reçine	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok uygun
SLS	Polimer/metal toz	Orta	Düşük	Düşük

1.3. Kulak Kalıplarının Yapısı ve Gereksinimleri

Kulak kalıpları, işitme cihazlarının dış kulak kanalı ile olan etkileşimini belirleyen ve cihaz performansını doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir. Bu yapılar, sesin kulak kanalına kontrollü şekilde iletilmesini sağlarken aynı zamanda akustik sızdırmazlık, geri besleme kontrolü ve kullanıcı konforu gibi kritik fonksiyonları yerine getirir. Kulak kalıbının geometrisi ve malzeme özellikleri, düşük frekans kazancı, rezonans davranışı ve cihazın uzun süreli kullanım stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Dillon, 2012; Kuk & Keenan, 2006).

Dış kulak kanalının anatomik yapısı bireyler arasında önemli farklılıklar gösterdiğinden, kulak kalıplarının kişiye özel olarak tasarlanması gereklidir. Yetersiz uyum gösteren kalıplar, akustik kaçaklara, istenmeyen geri besleme oluşumuna ve lokal basınç noktalarına bağlı cilt irritasyonuna neden olabilmektedir (Kuk vd., 2009). Bu nedenle kulak kalıbı tasarımında yalnızca akustik gereksinimler değil, aynı zamanda ergonomik ve biyolojik faktörler de dikkate alınmalıdır.

Kulak kalıpları, sınırlı havalandırmaya sahip, nemli ve sıcak bir mikro ortamda kullanıldıkları için mikrobiyal kolonizasyon açısından riskli medikal ürünler arasında yer almaktadır. Literatürde, uzun süreli işitme cihazı kullanımının kulak kanalında bakteri ve mantar yükünü artırabildiği ve bunun otitis externa gelişimine zemin hazırlayabildiği rapor edilmiştir (Orji vd., 2014; Karaca vd., 2013). Bu nedenle kulak kalıplarının yapısal gereksinimleri yalnızca mekanik dayanım ve akustik performans ile sınırlı olmayıp, hijyen ve biyolojik güvenlik kriterlerini de kapsamaktadır.

1.3.1. Medikal Polimerler ve Biyouyumluluk Kriterleri

Kulak kalıplarında kullanılan medikal polimerlerin seçimi, uzun süreli deri teması ve tekrarlı mekanik yükleme koşulları nedeniyle biyouyumluluk açısından titizlikle değerlendirilmelidir. Biyouyumluluk, bir malzemenin hedeflenen biyolojik ortamda toksik, iritan veya advers bir doku yanıtı oluşturmadan işlevini yerine getirebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Williams, 2008). Bu bağlamda, kulak kalıplarında kullanılan polimerlerin yalnızca mekanik özellikleri değil, aynı zamanda biyolojik güvenliği de temel tasarım kriterleri arasında yer almaktadır.

Medikal polimerlerin biyouyumluluğu; kimyasal bileşim, moleküler ağırlık dağılımı, üretim sürecinde kullanılan katkı maddeleri ve olası bozunma ürünleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Özellikle fotopolimer esaslı sistemlerde, tam kürlenmemiş monomerler ve fotobaşlatıcı kalıntıları cilt teması sırasında irritasyon veya hassasiyet oluşturma potansiyeline sahiptir (Quan vd., 2020). Bu nedenle kulak

kalıpları gibi sürekli temas eden ürünlerde monomer dönüşüm oranının yüksek olması ve artık bileşenlerin minimize edilmesi büyük önem taşır.

Biyouyumluluk değerlendirme sürecinde ISO 10993 serisi standartlar, uluslararası kabul görmüş temel referanslar arasında yer almaktadır. Bu standartlar, biyolojik testlere geçilmeden önce malzemenin kimyasal karakterizasyonunun yapılmasını ve potansiyel risklerin sistematik olarak analiz edilmesini önermektedir (ISO 10993-1, 2018). Kimyasal eşdeğerliği daha önce onaylanmış medikal materyallerle gösterilebilen sistemlerde, ek biyolojik test gereksinimi azaltılabilmektedir (Hallab & Jacobs, 2009).

Ancak malzeme formülasyonunda yapılan her değişiklik, özellikle nanopartikül katkısı gibi fonksiyonel modifikasyonlar söz konusu olduğunda, biyolojik risk değerlendirmesinin yeniden yapılmasını gerektirir. Nanopartikül katkılı polimerlerde parçacık boyutu, yüzey fonksiyonelliği ve polimer matrisi ile bağlanma şekli, partikül salınımı ve potansiyel toksisite açısından kritik parametrelerdir (Jafari vd., 2020). Uygun şekilde stabilize edilmemiş nanopartiküller, yüzeyden ayrılarak lokal inflamatuvar yanıtları tetikleyebilir.

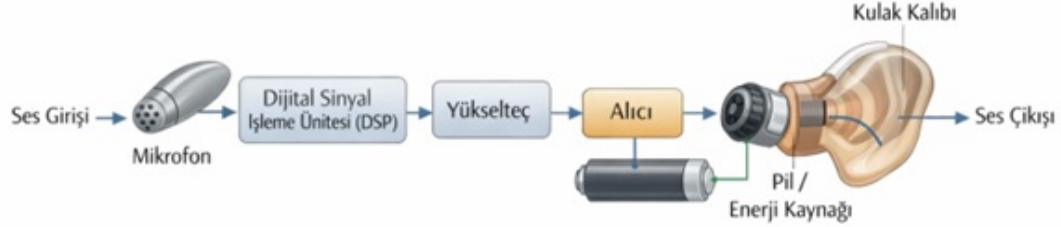
Polimer–doku etkileşimini belirleyen bir diğer önemli unsur yüzey özellikleridir. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisi hem hücre yanıtını hem de bakteri adezyonunu doğrudan etkilemektedir. Düşük pürüzlülüğe sahip yüzeylerin, bakteriyel tutunmayı ve biyofilm oluşumunu azalttığı; aynı zamanda mekanik irritasyon riskini düşürdüğü bildirilmektedir (Busscher ve arks., 2010). Bununla birlikte, aşırı hidrofilik yüzeylerin su absorpsiyonunu artırarak boyutsal stabiliteyi olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kulak kalıpları gibi dar anatomik boşluklarda kullanılan ürünlerde, sınırlı su absorpsiyonu ve uzun süreli boyutsal kararlılık akustik performans açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca malzemenin kullanım süresi boyunca göstereceği fiziksel ve kimyasal bozunma davranışı da değerlendirilmelidir. Bozunma sonucunda açığa çıkabilecek düşük molekül ağırlıklı ürünlerin biyolojik etkileri, biyouyumluluk analizinin ayrılmaz bir parçasıdır (Williams, 2008).

1.3.2. İşitme Cihazı Komponentleri

İşitme cihazları, işitme kaybının tipine ve derecesine bağlı olarak farklı tasarım konfigürasyonlarında geliştirilen, çok bileşenli elektroakustik sistemlerdir. Bu cihazlar, akustik enerjinin algılanması, işlenmesi, güçlendirilmesi ve yeniden

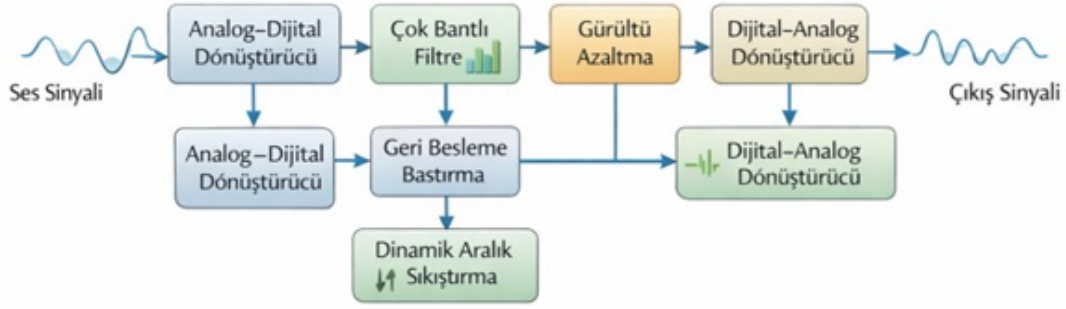
ses enerjisine dönüştürülmesi aşamalarını kapsayan bir sinyal zinciri üzerinden çalışır. Temel bir işitme cihazında yer alan ana komponentler; mikrofon, dijital sinyal işleme ünitesi (DSP), alıcı (receiver), enerji kaynağı ve kulak kalıbıdır (earmold). Bu bileşenlerin birbirleriyle olan fonksiyonel ilişkisi ve sinyal akış sırası Şekil 1.2’de şematik olarak gösterilmiştir (Dillon, 2012).



Şekil 1.2. İşitme cihazının temel bileşenleri ve akustik sinyal iletim zinciri (Dillo, 2012).

Mikrofon, ortamdaki gelen ses dalgalarını elektriksel sinyallere dönüştüren giriş transdüseridir. Güncel işitme cihazlarında yaygın olarak elektret kondansatör mikrofonlar kullanılmakta olup, bu mikrofonlar tek yönlü veya çok yönlü çalışma prensiplerine göre tasarlanabilmektedir. Yönlü mikrofonlar, hedeflenen konuşma kaynağına odaklanarak sinyal-gürültü oranını artırırken; çok yönlü mikrofonlar çevresel seslerin daha doğal algılanmasını sağlar. Mikrofon diyaframının kütlesi ve yüzey özellikleri, özellikle yüksek frekans duyarlılığı açısından kritik öneme sahiptir (Kuk & Keenan, 2006).

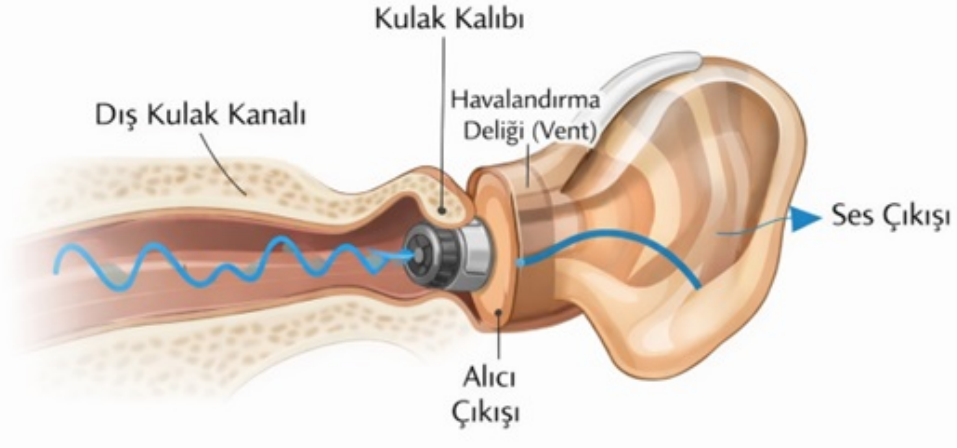
Mikrofondan elde edilen elektriksel sinyaller, modern işitme cihazlarında dijital sinyal işleme (DSP) birimine aktarılmaktadır. DSP modülü, çok bantlı filtreleme, adaptif gürültü azaltma, geri besleme bastırma ve konuşma anlaşılabilirliğini artırmaya yönelik algoritmalar aracılığıyla sinyali kullanıcının işitme profiline uygun hâle getirir. DSP temelli sinyal işleme sürecinin temel aşamaları Şekil 1.3’te gösterilmiştir. İşlem gecikmesinin düşük olması (genellikle <10 ms), yankı hissini önlenmesi ve doğal işitsel algının korunması açısından önemlidir (Dillon, 2012).



Şekil 1.3. Dijital işitme cihazlarında DSP tabanlı sinyal işleme akış şeması.

İşlenen sinyal, alıcı (receiver) aracılığıyla yeniden akustik enerjiye dönüştürülür. Alıcılar genellikle elektromanyetik bobin ve diyafram kombinasyonundan oluşur ve çıkış güçleri kullanıcının ihtiyaç duyduğu maksimum ses basınç seviyesine göre belirlenir. Kulak içi yerleşimli alıcılar ergonomik avantaj sağlamakla birlikte, nem ve ısıya karşı daha hassas yapılardır (Dillon, 2012). İşitme cihazlarının enerji ihtiyacı geleneksel olarak çinko-hava piller ile karşılanmaktadır. Bu piller düşük voltajda kararlı enerji sağlamaları ve uzun raf ömürleri nedeniyle tercih edilmektedir. Son yıllarda ise şarj edilebilir lityum-iyon bataryalar, kablosuz bağlantı ve yüksek işlem gücü gerektiren cihazlarda yaygınlaşmıştır. Enerji kaynağının cihaz içerisindeki konumu, nem yalıtımı ve bakım kolaylığı açısından tasarımda dikkate alınmalıdır (Kramer vd., 2021).

Bu elektronik bileşenler arasında kulak kalıbı, işitme cihazının kullanıcıya uyum sağlamasında hem mekanik hem de akustik açıdan kilit rol üstlenmektedir. Kulak kalıbı ile dış kulak kanalı arasındaki akustik sızdırmazlık, özellikle düşük frekans kazancını doğrudan etkilemektedir. Bu arayüzdeki sızdırmazlık prensibi Şekil 1.4'te gösterilmektedir. Yetersiz uyum, akustik kaçaqlara ve geri besleme problemlerine yol açabilmektedir (Kuk vd., 2009).



Şekil 1.4. Kulak kalıbı ile dış kulak kanalı arasındaki akustik sızdırmazlık ve ses iletim prensibi.

Kulak kalıplarında kullanılan malzeme tipi, hem kullanıcı konforu hem de akustik performans üzerinde belirleyicidir. Sert akrilik kulak kalıpları yüksek ölçü hassasiyeti ve boyutsal kararlılık sunarken, silikon esaslı kalıplar esneklikleri sayesinde uzun süreli kullanımda konfor sağlamaktadır. Ancak silikon kalıplarda nem tutulumu ve tıkanıklık hissi riski daha yüksek olabilmektedir (Erdoğan & Arslan, 2016).

Kulak kalıbının yüzey morfolojisi, bakteriyel tutunma ve biyofilm oluşumu açısından kritik öneme sahiptir. Pürüzlü yüzeyler mikroorganizma adezyonunu kolaylaştırırken, düşük pürüzlülüğe sahip ve fonksiyonel katkılarla güçlendirilmiş yüzeyler enfeksiyon riskini azaltabilmektedir. Fotokatalitik özellik gösteren TiO_2 katkılı polimerler, UV ışık altında reaktif oksijen türleri üreterek bakteri hücre zarlarında oksidatif hasar oluşturmakta ve biyofilm gelişimini baskılamaktadır (Foster vd., 2011; Vivero-López vd., 2021). İşitme cihazını oluşturan temel bileşenlerin işlevleri ve cihaz performansına olan etkileri Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. İşitme cihazı bileşenlerinin işlevleri ve performansa etkileri.

Bileşen	Temel işlev	Cihaz performansına etkisi
Mikrofon	Akustik sinyali elektrik sinyaline dönüştürme	Sinyal-gürültü oranı
DSP	Dijital sinyal işleme	Konuşma anlaşılabilirliği
Alıcı (Receiver)	Elektrik sinyalini sese dönüştürme	Maksimum ses basıncı
Enerji kaynağı	Güç sağlama	Kullanım süresi
Kulak kalıbı	Akustik sızdırmazlık ve uyum	Düşük frekans kazancı

1.4. Kulak İçi Protezlerde Kullanılan Polimerik Malzemeler

Kulak içi protez ve kalıplarda kullanılan polimerik malzemeler, mekanik dayanım, esneklik, biyouyumluluk ve işlenebilirlik açısından geniş bir yelpazeye sahiptir. Polimerlerin düşük yoğunlukları ve karmaşık geometrilere uyarlanabilme kapasiteleri, kişiye özel medikal cihaz üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Quan vd., 2020).

1.4.1. Ultraviyole ile Sertleşen Reçineler

UV ile sertleşen fotopolimer reçineler, vat fotopolimerizasyon temelli 3D baskı teknolojilerinde yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesi sağlamaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotobaşlatıcıların UV ışık altında aktive olmasıyla başlayan polimerizasyon süreci, sıvı reçinenin kısa sürede katı hâle geçmesini mümkün kılmaktadır. Fotobaşlatıcı türü, ışık dalga boyu ve monomer yapısı nihai ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Quan vd., 2020).

TiO₂ nanopartiküllerinin UV sertleşen reçinelere kontrollü şekilde eklenmesi, fotokatalitik ve antibakteriyel özellikler kazandırırken, aşırı yüklenme durumunda optik geçirgenliğin azalmasına ve kürlenme derinliğinin sınırlanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle nanopartikül dağılımının homojenliği ve optimum konsantrasyon seçimi kritik öneme sahiptir.

1.4.2. Diğer Fotopolimer Türleri

Akrilat ve metakrilat bazlı sistemlerin yanı sıra, PMMA türevleri ve poliüretan-akrilat hibritleri de medikal uygulamalarda tercih edilmektedir. PMMA-temelli fotopolimerler yüksek optik şeffaflık sunarken, poliüretan esaslı sistemler daha yüksek esneklik sağlayarak konforu artırmaktadır. Bu malzemelerin fonksiyonel katkılarla modifiye edilmesi, antibakteriyel veya mekanik olarak güçlendirilmiş kompozit yapıların geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Zore vd., 2022; Jafari vd., 2020).

1.4.3. Medikal Kullanımda Polimerlerin Avantajları ve Sınırlamaları

Polimerlerin medikal uygulamalardaki en önemli avantajları arasında hafiflik, şekillendirilebilirlik ve yüzey modifikasyonuna uygunluk yer almaktadır. Elastomerik polimerler, anatomik uyumu artırarak uzun süreli kullanımda konfor sağlar. Bununla birlikte, fotopolimer reçinelerin kırılma eğilimi, düşük darbe dayanımı ve fotobaşlatıcı artıklarının olası biyolojik etkileri dikkate alınması gereken sınırlamalardır (Quan vd., 2020).

Bu nedenle kulak içi protezlerde polimer seçimi yapılırken mekanik performans, biyolojik güvenlik ve üretim tekniği birlikte değerlendirilmelidir. TiO_2 gibi biyoyumlu katkılarla fonksiyonelleştirilmiş polimer sistemler, bu gereksinimleri bütüncül biçimde karşılayabilecek potansiyel sunmaktadır.

1.5. Titanyum Dioksit Biyomedikal Uygulamalardaki Önemi

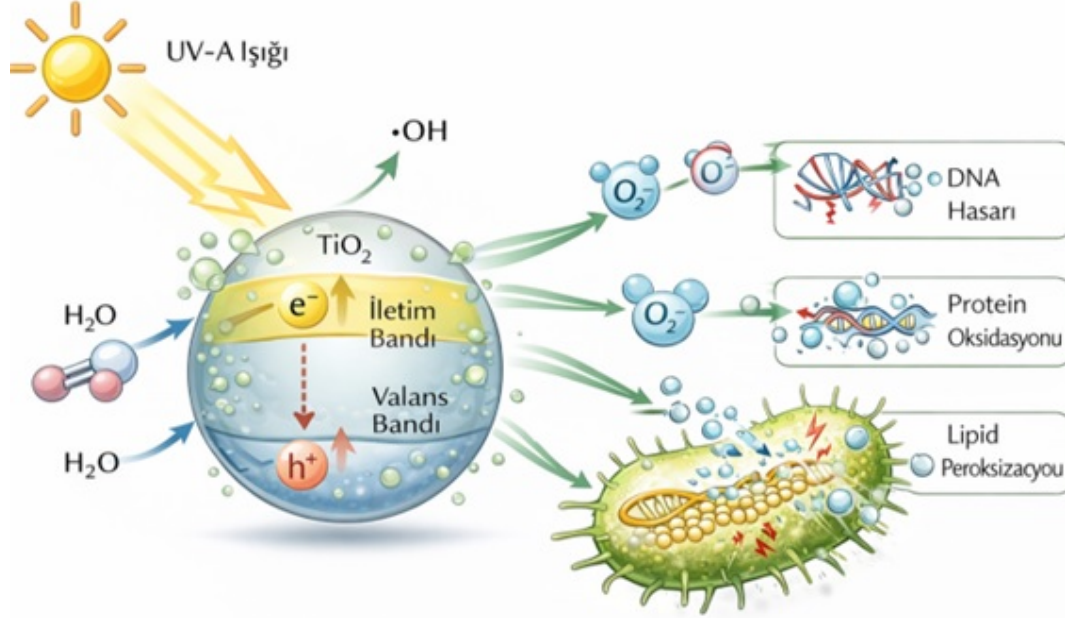
Titanyum dioksit (TiO_2), yüksek kimyasal kararlılığı, biyoyumluluğu ve fotokatalitik özellikleri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan metal oksitlerden biridir. Özellikle nanopartikül boyutuna indirgenmiş TiO_2 yapıları, artan özgül yüzey alanı sayesinde yüzeyle etkileşimi güçlendirmekte ve fonksiyonel özelliklerin belirginleşmesini sağlamaktadır. Bu özellikler, TiO_2 'yi implant yüzey kaplamaları, medikal cihazlar ve antibakteriyel kompozit sistemler için cazip bir malzeme hâline getirmektedir (Foster vd., 2011; Jafari vd., 2020).

1.5.1. Antibakteriyel Özellikleri

Şekil 1.1'de TiO_2 nanopartiküllerinin fotokatalitik sürece dayalı antibakteriyel etkisi şematik olarak gösterilmektedir. Titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerinin antibakteriyel etkisi, temel olarak yarı iletken özelliklerinden kaynaklanan fotokatalitik reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmektedir. TiO_2 , uygun dalga boyundaki ışığa (çoğunlukla UV-A, $\lambda < 385$ nm) maruz kaldığında valans bandından iletim bandına elektron geçişi meydana gelir ve bu süreç sonucunda elektron–delik (e^-/h^+) çiftleri oluşur. Oluşan pozitif yüklü delikler (h^+), yüzeyde adsorbe olmuş su moleküllerini veya hidroksil gruplarını oksitleyerek hidroksil radikalleri ($\bullet OH$) üretirken; iletim bandındaki elektronlar çözünmüş oksijeni indirger ve süperoksit anyonları ($O_2^{\bullet -}$) ile ikincil reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumuna yol açar (Fujishima, Zhang & Tryk, 2008; Foster vd., 2011).

Ortaya çıkan bu reaktif türler, yüksek oksidasyon potansiyelleri sayesinde bakteri hücre zarını doğrudan hedef alır. İlk aşamada hücre

membranındaki doymamış lipidlerin peroksidasyonu başlar ve membran akışkanlığı bozulur. Bu durum iyon dengesinin kaybına, küçük moleküllerin kontrolsüz geçişine ve membran potansiyelinin çökmesine neden olur. ROS maruziyeti devam ettikçe peptidoglikan yapılar hasara uğrar, sitoplazmik zar bütünlüğü kaybolur ve hücre lizisi gerçekleşir (Foster vd., 2011).



Şekil 1.1. TiO₂ nanopartiküllerinin fotokatalitik sürece dayalı antibakteriyel etkisi.

Membran hasarına ek olarak, ROS protein oksidasyonu yoluyla enzimatik aktiviteyi inhibe eder ve hücre metabolizmayı durma noktasına getirir. Aynı zamanda DNA bazlarında oksidatif modifikasyonlar meydana gelir; bu durum replikasyon ve transkripsiyon süreçlerini bozarak genotoksik etkilere yol açar (Hashimoto vd., 2005). Özellikle süperoksit ve hidrojen peroksit gibi daha uzun ömürlü ROS türlerinin katalizör yüzeyinden uzak bölgelere difüze olabilmesi, antibakteriyel etkinliğin yalnızca temas alanı ile sınırlı kalmamasını sağlar.

TiO₂'nin antibakteriyel performansı, kristal faz yapısına da doğrudan bağlıdır. Anataz fazı, daha yüksek yüzey alanı ve daha düşük elektron–delik yeniden birleşme hızı nedeniyle ROS üretiminde daha etkilidir. Rutil fazı ise daha düşük fotokatalitik aktiviteye sahip olmakla birlikte uzun vadeli yapısal stabilite sağlar. Bu nedenle, polimer kompozitlerde anataz–rutil oranının dengelenmesi hem antibakteriyel etkinlik hem de malzeme dayanımı açısından kritik kabul edilmektedir (Jimmy vd., 2002).

Fotokatalitik mekanizma yalnızca planktonik bakteriler üzerinde değil, aynı zamanda biyofilm yapıları üzerinde de etkilidir. ROS, biyofilm matriksini oluşturan ekstraselüler polimerik maddeleri (EPS) oksidatif olarak parçalayarak hücreler arası bağlanmayı zayıflatır ve biyofilmin substrata tutunmasını engeller. Bu durum özellikle *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* gibi biyofilm oluşturmaya yatkın patojenlerde koloni yoğunluğunda belirgin azalma ile sonuçlanmaktadır (Foster vd., 2011).

Kulak kalıpları gibi uzun süreli cilt teması olan medikal uygulamalarda, TiO_2 nanopartiküllerinin polimer matris içinde homojen dağılımı antibakteriyel etkinliğin sürekliliği açısından önemlidir. Yüzey pürüzlülüğünün azalması, bakteriyel adezyonun ilk aşamasını zorlaştırarak fotokatalitik etkiye ek bir pasif koruma mekanizması oluşturur.

1.5.2. Biyoyumluluk ve Toksikite Değerlendirmeleri

Titanyum dioksit (TiO_2), uzun yıllardır kozmetik, gıda ve medikal uygulamalarda kullanılan ve genel olarak biyoyumlu kabul edilen bir metal oksittir. Ancak nanopartikül boyutuna indirildiğinde, artan yüzey alanı ve reaktivite nedeniyle biyolojik sistemlerle etkileşimi farklılık gösterebilir. Bu nedenle TiO_2 nanopartikül içeren medikal cihazlarda biyoyumluluk ve toksisite değerlendirmeleri hem in vitro hem de in vivo yaklaşımlarla ele alınmalıdır (Iavicoli vd., 2012).

Hücre kültürü çalışmalarında TiO_2 nanopartiküllerinin, düşük konsantrasyonlarda hücresel antioksidan savunma mekanizmalarını aktive ettiği; yüksek konsantrasyonlarda ise aşırı ROS üretimi yoluyla oksidatif stres, inflamasyon ve apoptotik sinyal yollarını tetiklediği gösterilmiştir. Özellikle nrf2 ve NF- κ B yollarının bu süreçte kilit rol oynadığı rapor edilmiştir (Shi vd., 2013). UV ışığı altında fotokatalitik olarak aktive olan TiO_2 'nin memeli hücrelerinde DNA hasarı oluşturabileceği de literatürde bildirilmiştir; ancak bu etkinin büyük ölçüde ışık şiddeti, maruziyet süresi ve partikül konsantrasyonuna bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Nagaraj vd., 2025).

Hayvan modellerinde yapılan sistemik toksisite çalışmalarında, yüksek doz TiO_2 nanopartikül maruziyetinin karaciğer ve akciğer dokularında inflamatuvar yanıtları artırabildiği; TNF- α ve IL-6 gibi sitokin seviyelerinde yükselmeye neden olduğu bildirilmiştir (Iavicoli vd., 2012). Bununla birlikte, dermal temas senaryolarında sistemik dağılımın oldukça sınırlı olduğu ve partiküllerin büyük ölçüde lokal dokuda kaldığı gösterilmiştir.

Kulak kalıpları özelinde değerlendirildiğinde, TiO₂ nanopartiküllerinin polimer matris içerisinde kapsüllenmiş olması, serbest partikül salınımını önemli ölçüde sınırlar ve toksisite riskini azaltır. ISO 10993 standartlarında da vurgulandığı üzere, biyouyumluluk değerlendirmesi kimyasal karakterizasyon ile başlamalı; ardından sızma (leaching), sitotoksisite ve irritasyon testleri ile desteklenmelidir (ISO 10993-1, 2018).

Partikül boyutu da toksisite açısından belirleyici bir faktördür. 10–20 nm aralığındaki TiO₂ nanopartiküllerinin hücreler tarafından endositoz yoluyla internalize edilebildiği ve lizozomal ortamda ROS üretimini artırabildiği rapor edilmiştir (Shi vd., 2013). Bu nedenle antibakteriyel etkinlik hedeflenirken nanopartikül boyutu ve yükleme oranı dikkatle optimize edilmelidir.

Sonuç olarak, TiO₂ katkılı kulak kalıplarında biyouyumluluk–antibakteriyel etkinlik dengesi; kristal faz oranı, partikül boyutu, konsantrasyon, ışık maruziyeti ve polimer matrisle bağlanma biçimi gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Doğru tasarım stratejileri ile TiO₂, enfeksiyon riskini azaltan ve uzun süreli kullanımda güvenli kabul edilebilecek fonksiyonel bir katkı malzemesi olarak öne çıkmaktadır.

1.6. Üç Boyutlu Baskı Teknolojisinin Kişiyeye Özel Medikal Üretimdeki Yeri

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri, medikal cihaz üretiminde kişiyeye özel tasarım ve yüksek üretim hassasiyeti gereksinimlerini karşılayan yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinde standart ölçülere dayalı üretim ön plandayken, 3D baskı teknolojileri bireysel anatomik verilerin doğrudan üretim sürecine aktarılmasına olanak tanımaktadır. Bu özellik, özellikle işitme cihazları, dental uygulamalar ve ortopedik implantlar gibi hasta anatomisine birebir uyum gerektiren medikal ürünlerde klinik başarıyı artıran temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Ventola, 2014; Yan vd., 2018).

Kişiyeye özel medikal üretimde dijital görüntüleme, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve eklemeli imalat süreçlerinin entegrasyonu hem üretim süresini kısaltmakta hem de tekrarlanabilirliği artırmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde ölçüm hataları minimize edilmekte, manuel işlemlere bağlı varyasyonlar ortadan kaldırılmakta ve medikal cihazların fonksiyonel performansı daha öngörülebilir hâle gelmektedir.

1.6.1. DLP Baskı Teknolojisi

Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing, DLP) teknolojisi,

fotopolimerizasyon esaslı 3D baskı yöntemleri arasında yüksek çözünürlük, hızlı üretim ve yüzey kalitesi avantajlarıyla öne çıkan bir tekniktir. Bu yöntemde sıvı hâlde bulunan fotopolimer reçine, dijital bir projektör aracılığıyla tanımlanan katmanın tamamına aynı anda ışık uygulanarak kürlenmektedir. Katman bazlı bu eş zamanlı pozlama prensibi, üretim süresini kısaltırken boyutsal doğruluğu artırmaktadır (Quan vd., 2020).

Stereolitografi (SLA) sistemlerinde lazerin noktasal tarama yaparak katmanı oluşturmasına karşın, DLP sistemlerinde tüm katman tek adımda sertleştirilmektedir. Bu durum, özellikle seri üretim gerektiren ve mikron seviyesinde toleranslara ihtiyaç duyulan medikal bileşenler açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Katman kalınlığı genellikle 25–100 µm aralığında seçilmekte olup, bu parametre nihai ürünün dikey çözünürlüğünü ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilemektedir (Quan vd., 2020).

DLP baskı süreçlerinde kullanılan fotopolimer reçinelerin kimyasal bileşimi, elde edilen ürünün mekanik, optik ve biyolojik özellikleri üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Monomer–oligomer oranı, fotobaşlatıcı türü ve konsantrasyonu, kürlenme kinetiğini ve nihai polimer ağ yapısını doğrudan etkilemektedir. Akrilat bazlı fotopolimer sistemler yüksek sertlik ve boyutsal kararlılık sağlarken, poliüretan akrilat esaslı reçineler daha yüksek esneklik ve darbe direnci sunabilmektedir. Kulak kalıbı gibi uzun süre vücutla temas eden medikal ürünlerde bu parametrelerin dengeli şekilde seçilmesi hem anatomik uyum hem de kullanıcı konforu açısından kritik öneme sahiptir (Quan vd., 2020).

Fotopolimer reçinelere titanyum dioksit (TiO₂) nanopartiküllerinin eklenmesi, malzemeye fonksiyonel özellikler kazandırabilmektedir. TiO₂, fotokatalitik etkisi sayesinde reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek antibakteriyel ve antibiyofilm davranış sergileyebilmektedir. Bununla birlikte, yüksek kırılma indisli nanopartiküller ışık saçılımını artırarak kürlenme derinliğini ve baskı başarısını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle nanopartikül yüklemesinin homojen dağılım sağlayacak şekilde ve optik geçirgenliği koruyacak oranlarda yapılması gerekmektedir (Jafari vd., 2020).

DLP teknolojisinin sunduğu bir diğer önemli avantaj, karmaşık geometrilerin yüksek doğrulukla üretilebilmesidir. Bu özellik, anatomik olarak birebir uyum gerektiren kulak kalıplarında büyük önem taşımaktadır. Hastanın kulak kanalından elde edilen dijital veriler doğrudan baskı sürecine aktarılabilen ve

mikron seviyesinde toleranslarla üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca DLP sistemlerinde kullanılan destek yapılarının kolay çözünebilen fotopolimerlerden üretilmesi, medikal cihazlarda yüzey kalıntılarının tamamen temizlenmesine olanak tanıyarak biyouyumluluğu artırmaktadır (Quan vd., 2020).

1.6.2. Avantajlar ve Kısıtlamalar

DLP tabanlı 3D baskı teknolojisinin medikal üretimde sunduğu başlıca avantajlardan biri, yüksek hassasiyetli geometrilerin kısa sürede ve tekrarlanabilir biçimde üretilmesidir. Katmanların eş zamanlı olarak pozlanması, üretim süresini önemli ölçüde azaltırken; doğru reçine formülasyonu ile mikron düzeyinde toleranslara sahip yapılar elde edilebilmektedir. Bu durum, anatomik uyumun kritik olduğu kulak kalıpları gibi medikal cihazlarda hem akustik performansı hem de kullanıcı konforunu olumlu yönde etkilemektedir (Vivero-López vd., 2021).

Dijital modelleme verilerinin doğrudan üretime aktarılabilmesi, kişiselleştirilmiş medikal cihazlarda tasarım–üretim zincirini hızlandırmakta ve hata payını azaltmaktadır. TiO₂ nanopartikül katkılı fotopolimerlerin kullanımı ise çift yönlü bir avantaj sunmaktadır. Antibakteriyel ve antibiyofilm özellikler sayesinde enfeksiyon riski azaltılırken, fotokatalitik etkiler yüzeyde organik kontaminasyonun birikmesini sınırlayabilmektedir (Jafari vd., 2020; Yan vd., 2018).

Bununla birlikte, DLP baskı teknolojisinin bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Nanopartikül katkısının optik soğurma ve saçılma üzerindeki etkileri, kürlenme derinliğini sınırlayabilmekte ve baskı kalitesini düşürebilmektedir. Ayrıca fotopolimer reçinelerin uzun süreli mekanik dayanımı ve yaşlanma davranışı, kulak kanalı gibi nemli ve sıcak ortamlarda dikkatle değerlendirilmelidir. Bu nedenle malzeme formülasyonu ve post-kürleme süreçlerinin optimize edilmesi, klinik uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır (Quan vd., 2020).

1.6.3. Medikal Uygulama Örnekleri

Üç boyutlu baskı teknolojilerinin medikal alandaki uygulamaları, yalnızca üretim süreçlerini hızlandırmakla sınırlı olmayıp hasta güvenliği, klinik doğruluk ve tedavi başarısı üzerinde de doğrudan etkiye sahiptir. Özellikle karmaşık anatomik yapıların söz konusu olduğu cerrahi alanlarda, hastaya özgü tasarım ve üretim yaklaşımları klinik sonuçların iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretilen hasta-özümler ve implantlar, modern tıbbın önemli araçları arasında yer almaktadır (Yan vd., 2018).

Ortopedi ve travmatoloji alanlarında, hastanın anatomik verilerine dayalı olarak tasarlanan implantların mekanik ve biyolojik uyum açısından üstünlük sağladığı çok sayıda çalışmada rapor edilmiştir. Özellikle gözenekli metal yapılar ve hasta-özgü geometrilere sahip implantlar, kemik dokusu ile entegrasyonu destekleyerek osteointegrasyon sürecini hızlandırmaktadır. Literatürde, porozite oranı ve yüzey topografisi kontrollü olarak tasarlanan ortopedik implantların, eklemli imalat yöntemleriyle başarılı şekilde üretildiği ve klinik açıdan olumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Wang vd., 2016).

Bu tür implantlarda tasarım doğruluğu, yalnızca mekanik stabilite açısından değil, aynı zamanda implant-kemik arayüzünde biyomekanik uyumun sağlanması açısından da kritik öneme sahiptir. Eklemli imalat teknikleri sayesinde implant geometrisi, yük taşıma gereksinimleri ve kemik dokusunun elastik özellikleri dikkate alınarak optimize edilebilmektedir. Özellikle titanyum ve titanyum alaşımlarından üretilen hasta-özgü kafes ve implantların, omurga ve uzun kemik cerrahilerinde başarılı entegrasyon sağladığı bildirilmiştir (Murr, 2016).

Benzer bir yaklaşım, anatomik uyumun fonksiyonel performansı doğrudan etkilediği diğer medikal cihazlar için de geçerlidir. Kulak kalıpları gibi uzun süre vücutla temas eden ve hassas toleranslar gerektiren yapılarda, bireyin anatomik ölçülerinin yüksek doğrulukla kopyalanması hem fonksiyonel etkinliği hem de kullanım konforunu artırmaktadır. Kulak kanalının geometrisinin birebir modellenmesi, akustik kaçakların azaltılmasına ve basınç kaynaklı tahrişin önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle, ortopedik implantlarda benimsenen hasta-özgü tasarım ve üretim prensiplerinin, işitme cihazı bileşenlerine uyarlanabilir olduğu değerlendirilmektedir.

Bunun yanı sıra, 3D baskı teknolojileri cerrahi planlama ve eğitim amaçlı medikal modellerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kardiyovasküler cerrahi, maksillofasiyal cerrahi ve ortopedik girişimlerde kullanılan hasta-özgü anatomik modeller, cerrahların operasyon öncesinde müdahale stratejilerini daha doğru biçimde belirlemelerine olanak tanımaktadır. Bu tür uygulamaların, operasyon süresini kısalttığı ve komplikasyon riskini azalttığı bildirilmektedir (Yan vd., 2018).

Son yıllarda, fonksiyonel katkılarla zenginleştirilmiş 3D baskılı polimer ve metal yüzeyler de medikal araştırmaların odak noktası hâline gelmiştir. Özellikle antibakteriyel özellik kazandırılmış yüzeylerin, uzun süreli implant ve cihaz kullanımında enfeksiyon riskini azaltma potansiyeline sahip olduğu

gösterilmiştir. Bu yaklaşım, kulak kalıpları gibi uzun süreli temas gerektiren medikal ürünlerde hijyen ve biyogüvenlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Dolayısıyla, eklemeli imalat teknolojileri yalnızca geometrik kişiselleştirme değil, aynı zamanda fonksiyonel yüzey mühendisliği açısından da medikal uygulamalara yenilikçi katkılar sağlamaktadır.

1.7. İşitme Kaybı ve Medikal Önemi

İşitme kaybı, bireyin çevresel sesleri algılama ve ayırt etme yetisinin azalmasıyla ortaya çıkan, yaşam kalitesini, sosyal etkileşimi ve mesleki performansı doğrudan etkileyen önemli bir sağlık sorunudur. Dünya Sağlık Örgütü'nün yayımladığı güncel raporlara göre, dünya genelinde yüz milyonlarca birey klinik olarak anlamlı işitme kaybı yaşamaktadır ve bu durum, erken tanı ve uygun rehabilitasyon yaklaşımları uygulanmadığında bireysel ve toplumsal düzeyde ciddi sonuçlara yol açmaktadır (World Health Organization (WHO), 2021). İşitme kaybının yaygınlığı ve artan küresel yükü, işitme sağlığına yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Klinik sınıflandırmaya göre işitme kaybı, etkilenen anatomik yapıya bağlı olarak farklı alt tiplerde ele alınmaktadır. Sensorinöral işitme kaybı, iç kulakta yer alan koklear saç hücreleri veya işitsel sinir yollarındaki hasarlardan kaynaklanırken; iletim tipi işitme kaybı, dış ya da orta kulakta ses dalgalarının iletimini engelleyen patolojilerle ilişkilidir. Bu iki mekanizmanın birlikte etkilendiği durumlar ise mikst işitme kaybı olarak tanımlanmaktadır (Kramer vd., 2021). Normal işitme fizyolojisinde ses dalgaları dış kulak yolundan timpan zarına ulaşmakta, orta kulaktaki kemikçik zinciri aracılığıyla mekanik titreşimler güçlendirilerek iç kulağa iletilmekte ve burada sinirsel uyarılara dönüştürülmektedir. Sağlıklı bireylerde bu süreç büyük ölçüde hava yolu iletimine dayanmaktadır (Dillon, 2012).

İşitme kaybının fonksiyonel etkilerini azaltmaya yönelik en yaygın rehabilitasyon araçlarından biri işitme cihazlarıdır. Günümüzde kullanılan dijital işitme cihazları, gelişmiş sinyal işleme algoritmaları sayesinde konuşma sinyallerini çevresel gürültüden ayırt edebilmekte ve bireyin işitsel algısını anlamlı ölçüde iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte, işitme cihazlarının klinik başarısı yalnızca elektronik donanımın performansına bağlı olmayıp, cihaz ile kulak kanalı arasındaki fiziksel ve akustik etkileşimi sağlayan yapısal bileşenlere de doğrudan bağlıdır (Humes, 2013).

İşitme cihazlarının uzun süreli kullanımı, kulak kanalının nemli ve sıcak

yapısı nedeniyle bazı mikrobiyolojik ve dermatolojik problemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlayabilmektedir. Klinik ve mikrobiyolojik çalışmalar, işitme cihazı kullanıcılarında dış kulak yolu florasının değişebildiğini ve bu durumun bakteriyel veya fungal otitis externa riskini artırdığını göstermektedir (Karaca vd., 2013; Orji vd., 2014). Bu bağlamda, işitme cihazı bileşenlerinin yalnızca akustik açıdan değil, biyoyumluluk ve hijyen açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi, medikal cihaz tasarımında standart üretim yaklaşımlarının yerini hasta-özgü, fonksiyonel ve çok parametreliliğe tasarım anlayışına bırakmasına olanak sağlamıştır. Üç boyutlu (3B) baskı teknikleri; karmaşık geometrilerin üretilebilmesi, dijital verilerin doğrudan fiziksel ürüne dönüştürülebilmesi ve üretim süreçlerinin tekrarlanabilirliği gibi özellikleri sayesinde biyomedikal uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir (Ventola, 2014; Yan vd., 2018).

Literatürde, özellikle anatomik uyumun ve yüzey özelliklerinin klinik performansı doğrudan etkilediği medikal ürünlerde 3B baskının önemli avantajlar sunduğu bildirilmektedir. Ngo ve arkadaşları (2018), eklemeli imalat yöntemlerinin sağlık alanındaki kullanımını ele aldıkları çalışmalarında; kişiselleştirilmiş üretim, fonksiyonel yüzey entegrasyonu ve enfeksiyon riskinin azaltılmasının gelecekteki araştırmalar için kritik başlıklar olduğunu ifade etmiştir. Bu yaklaşım, klasik üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında ölçüm hatalarının azaltılması ve hasta konforunun artırılması açısından dikkat çekici sonuçlar ortaya koymaktadır (Gebler vd., 2014).

Fotopolimerizasyon esaslı 3B baskı yöntemleri, özellikle yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet gerektiren medikal uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu sistemler arasında yer alan DLP teknolojisi, katmanların tek seferde pozlanması prensibiyle çalışmakta ve üretim süresini kısaltırken geometrik doğruluğu artırmaktadır (Quan vd., 2020). Melchels ve arkadaşları (2010), bu tür sistemlerle üretilen polimerik yapıların daha homojen yüzey morfolojisine sahip olduğunu ve bunun hücrel ve mikrobiyal etkileşimler üzerinde belirleyici rol oynadığını bildirmiştir.

İşitme cihazlarının uzun süreli kullanımında karşılaşılan temel sorunlardan biri, dış kulak kanalında oluşan mikroklimatik değişikliklerdir. Nem ve sıcaklığın artması, kulak kanalında mikroorganizma çoğalmasını kolaylaştırmakta ve enfeksiyon riskini artırmaktadır. Klinik veriler, işitme cihazı kullanıcılarında dış kulak yolu enfeksiyonlarının daha sık görüldüğünü ve bu enfeksiyonların sıklıkla *Staphylococcus aureus* ve *Candida* türleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Brook, 2012; Orji vd., 2014). Benzer şekilde Karaca ve arkadaşları (2013), işitme cihazı kullanımının kulak kanalındaki patojen bakteri yoğunluğunu artırabildiğini göstermiştir.

Kulak kalıplarının üretiminde yaygın olarak kullanılan silikon ve akrilik bazlı polimerler, biyoyumlu olmalarına rağmen aktif antibakteriyel özelliklere sahip

değildir. Ayrıca geleneksel üretim süreçlerinde yüzey pürüzlülüğünün kontrolü sınırlı kalabilmekte ve bu durum bakteriyel adezyonu kolaylaştırabilmektedir (Kuk vd., 2009; Dillon, 2012). Bu nedenle son yıllarda, antibakteriyel fonksiyonlarla desteklenmiş polimer kompozitlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar artış göstermiştir.

Antibakteriyel özellik kazandırılmış 3B baskı malzemeleri üzerine yapılan çalışmalarda, polimer matrislere metal veya metal oksit nanopartiküllerinin eklenmesinin bakteri tutunmasını ve biyofilm oluşumunu önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir. González-Henríquez ve arkadaşları (2019), bu tür kompozit sistemlerde en sık kullanılan katkıların gümüş, çinko oksit ve titanyum dioksit olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde Vivero-López ve arkadaşları (2021), antibakteriyel polimer kompozitlerin medikal uygulamalarda enfeksiyon riskini azaltma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır.

Titanyum dioksit (TiO_2), yüksek kimyasal stabilitesi ve biyoyumluluğu sayesinde antibakteriyel uygulamalarda yaygın biçimde araştırılan metal oksitlerden biridir. Özellikle anataz fazındaki TiO_2 nanopartiküllerinin ultraviyole ışık altında fotokatalitik olarak aktive olduğu ve bu süreçte reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek bakteri hücre zarında oksidatif hasara neden olduğu bildirilmiştir (Foster vd., 2011). Oluşan ROS'un, hücre membran bütünlüğünü bozduğu, protein ve DNA yapılarını etkileyerek hücre ölümüyle sonuçlandığı ifade edilmektedir (Fujishima vd., 2008; Hashimoto vd., 2005).

TiO_2 'nin antibakteriyel etkisinin yalnızca serbest hâlde bulunan bakterilerle sınırlı olmadığı, aynı zamanda biyofilm yapılarının oluşumunu da baskılayabildiği literatürde belirtilmektedir. Fotokatalitik reaksiyonlar sonucunda oluşan oksidatif türlerin, biyofilm matriksini oluşturan polimerik yapıları parçalayarak hücreler arası bağlantıyı zayıflattığı rapor edilmiştir (Foster vd., 2011; González-Henríquez vd., 2019).

TiO_2 katkılı fotopolimer reçinelerle gerçekleştirilen çalışmalarda, antibakteriyel performansın nanopartikül konsantrasyonu ve dağılım homojenliği ile doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir. Jafari ve arkadaşları (2020), uygun katkı oranlarında antibakteriyel etkinliğin artırılabilirliğini; ancak yüksek TiO_2 yüklemesinin optik geçirgenliği azaltarak kurlenme derinliğini ve baskı kalitesini olumsuz etkileyebileceğini bildirmiştir. Bu durum, fotopolimerizasyon temelli baskı sistemlerinde malzeme formülasyonunun dikkatle optimize edilmesi gerektiğini

ortaya koymaktadır.

Nanopartikül katkılı medikal sistemlerin güvenli kullanımını açısından biyoyumluluk değerlendirmeleri kritik öneme sahiptir. ISO 10993-1 standardı, medikal cihazlarda biyolojik risk değerlendirmelerinin sistematik ve aşamalı biçimde gerçekleştirilmesini önermektedir (ISO 10993-1, 2018). Iavicoli ve arkadaşları (2012), TiO₂ nanopartiküllerinin serbest hâlde yüksek dozlarda toksik etkilere yol açabileceğini; ancak polimer matris içerisinde stabilize edilmiş sistemlerde bu riskin önemli ölçüde azaldığını rapor etmiştir.

Mevcut literatür incelendiğinde; TiO₂ katkılı polimer kompozitlerin antibakteriyel özellikleri, 3B baskı ile üretilen medikal yapıların mekanik ve biyolojik davranışları ve kişiye özel kulak kalıplarının akustik avantajları ayrı ayrı ele alınmıştır (Melchels vd., 2010; Quan vd., 2020; Yan et al., 2018). Ancak DLP tabanlı 3B baskı teknolojisi kullanılarak TiO₂ nanopartikül katkılı antibakteriyel kulak kalıplarının üretilmesi ve bu yapıların yapısal, mekanik ve biyolojik özelliklerinin bütüncül biçimde değerlendirildiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Bu çerçevede mevcut tez çalışması, DLP teknolojisinin sağladığı yüksek çözünürlük avantajını TiO₂ nanopartiküllerinin antibakteriyel ve antibiyofilm potansiyeli ile birleştirerek, işitme cihazı bileşenlerinde enfeksiyon riskinin azaltılmasına yönelik özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında, TiO₂ katkılı antibakteriyel kulak kalıplarının Dijital Işık İşleme (DLP) tabanlı üç boyutlu (3B) baskı yöntemiyle üretilmesi ve yapısal, mekanik ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çeşitli kimyasal, biyolojik ve yardımcı malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm malzemeler ticari olarak temin edilmiş olup, üretici firmaların önerileri doğrultusunda muhafaza edilmiş ve kullanılmıştır. Kulak kalıplarının üretiminde, DLP tipi 3B baskı sistemleriyle uyumlu, ultraviyole (UV) ışık ile kürlenebilen, biyomedikal uygulamalar için uygunluğu üretici tarafından belirtilmiş Alias Ear Mould marka fotopolimer reçine kullanılmıştır. Söz konusu reçine, Dokuz Kimya (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Reçinenin düşük viskoziteli yapısı, yüksek çözünürlük sağlaması ve düzgün yüzey kalitesi sunması nedeniyle kulak kalıbı üretimi için tercih edilmiştir.

Antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla, fotopolimer reçineye nanopartikül katkısı olarak titanyum dioksit (TiO₂) nano toz kullanılmıştır. Kullanılan TiO₂ nanopartikülleri, Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiş olup, anataz kristal fazına ve yaklaşık 38 nm ortalama partikül boyutuna sahiptir. TiO₂ nano toz, yüksek özgül yüzey alanı ve fotokatalitik aktivitesi sayesinde antibakteriyel uygulamalar için uygun bir katkı malzemesi olarak tercih edilmiştir. TiO₂ nanopartiküller, fotopolimer reçineye ağırlıkça %0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 ve 3 oranlarda ilave edilerek çeşitli kompozisyonlar hazırlanmıştır.

Nanopartikül–reçine karışımlarının hazırlanması aşamasında manyetik karıştırıcı ve uygun karıştırma kapları kullanılmıştır. Baskı sonrası temizlik işlemleri için izopropil alkol (IPA) tercih edilmiş, numunelerin tam kürlenmesinin sağlanması amacıyla UV kürlenme işlemleri uygulanmıştır. Tüm deneysel süreçlerde kullanılan yardımcı sarf malzemeleri ve kimyasallar analitik saflıkta olup, deneysel güvenlik ve tekrarlanabilirlik esas alınarak kullanılmıştır.

3.2. DLP Tabanlı 3B Baskı için TiO₂ Katkılı Fotopolimer Reçine Karışımlarının Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, Dijital Işık İşleme (DLP) tabanlı üç boyutlu (3B) baskı yöntemi ile antibakteriyel özellik kazandırılmış kulak kalıplarının üretimi amacıyla, titanyum dioksit (TiO₂) nanopartikül katkılı fotopolimer reçine karışımları hazırlanmıştır. Karışım hazırlama süreci, TiO₂ nanopartiküllerinin fotopolimer matris

içerisinde homojen biçimde dağıtılmasını sağlamak, baskı sırasında oluşabilecek aglomerasyon ve faz ayrımını önlemek ve DLP baskı kalitesini olumsuz etkileyebilecek optik problemlerin minimize edilmesi amacıyla planlanmıştır.

Çalışmada kullanılan TiO_2 nanopartikülleri, anataz kristal fazına sahip ve ortalama partikül boyutu yaklaşık 38 nm olan nano toz formundadır. TiO_2 nanopartikülleri, UV ile kürlenebilen Alias Ear Mould marka fotopolimer reçineye ağırlıkça %0 (kontrol), %0.25, 0.50, 0.75, 1, %2 ve %3 oranlarında ilave edilmiştir. Hazırlanan tüm kompozisyonların içerikleri ve kodlamaları Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Kulak kalıbı için hazırlanan karışımların kompozisyonları.

Numune Kodu	% Ağırlıkça	
	UV reçine	TiO_2
Saf	100	-
Ti0.25	99.75	0.25
Ti0.50	99.5	0.5
Ti0.75	99.25	0.75
Ti1	99	1
Ti2	98	2
Ti3	97	3

Belirlenen TiO_2 oranlarına karşılık gelen TiO_2 nanopartikül miktarları, hassas terazi kullanılarak tartılmıştır (Şekil 3.1). Tartımı yapılan TiO_2 nano tozlar, önceden ölçülen fotopolimer reçine içerisine kademeli olarak ilave edilmiştir (Şekil 3.2). Reçine- TiO_2 karışımlarının homojenliğini sağlamak amacıyla, karışımlar oda sıcaklığında, manyetik karıştırıcı üzerinde 400 dev/dk karıştırma hızında ve 2 saat karıştırılmıştır (Şekil 3.3). Bu karıştırma koşulları, nanopartiküllerin reçine içerisinde uniform biçimde dağılmasını sağlamak ve çökme ile aglomerasyonu en aza indirmek amacıyla seçilmiştir.



Şekil 3.1. Titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerinin belirlenen oranlara göre hassas terazi kullanılarak tartılması.



Şekil 3.2. Alias Ear Mold UV reçinenin karıştırma kabına aktarılması.



Şekil 3.3. Reçine ile TiO₂ nanopartiküllerinin manyetik karıştırıcıda karıştırılması.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan reçine-TiO₂ karışımları, baskı sırasında oluşabilecek boşlukların ve yüzey hatalarının minimize edilmesi amacıyla kısa süre dinlendirilmiştir. Bu süreçte karışım içerisinde hapsolmuş olabilecek hava kabarcıklarının yüzeye çıkması sağlanmış ve gerekli durumlarda mekanik yöntemlerle giderilmiştir. Hazırlanan karışımlar, DLP tipi 3B yazıcının reçine haznesine aktarılmadan önce görsel olarak kontrol edilmiştir.

3.3. DLP Tabanlı 3B Yazıcı ile Numune Üretimi

Bu tez çalışmasında, TiO₂ nanopartikülleri ile katkılandırılmış fotopolimer reçineler kullanılarak antibakteriyel özellikli kulak kalıbı numunelerinin üretimi, Dijital Işık İşleme (DLP) tabanlı üç boyutlu (3B) baskı yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde, UV ışık ile fotopolimer reçineyi kürleyebilen ve yüksek çözünürlük sunan Elegoo Mars 4 model DLP tipi 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 3.4).



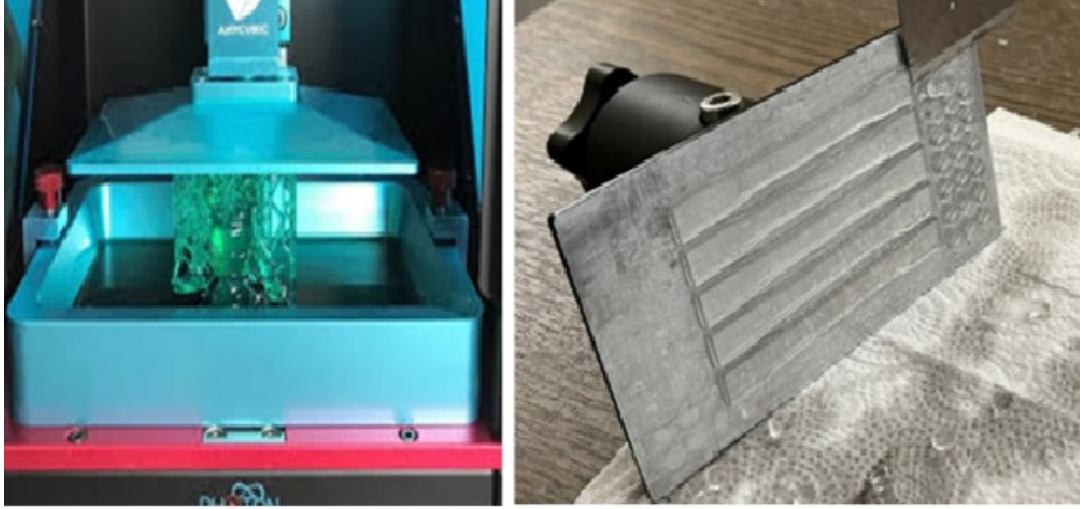
Şekil 3.4. DLP tipi 3B yazıcı.

Kulak kalıbı geometrilerinin dijital modelleri, tarama verilerine dayalı olarak UG (Unigraphics) yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve STL (Standard Tessellation Language) formatında dışa aktarılmıştır. Elde edilen STL dosyaları, yazıcıya ait dilimleme yazılımına aktarılmış ve baskı parametreleri bu aşamada tanımlanmıştır. Yazıcının UV ışık kaynağı dalga boyu $\lambda = 405$ nm olup, baskı işlemleri TiO_2 nanopartikülleri içeren UV ile kürlenabilir reçine karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Baskı işlemleri, DLP sistemlerinde yaygın olarak kullanılan aşağıdan yukarıya (bottom-up) üretim yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde yapı, şeffaf reçine haznesinin tabanından başlayarak katman katman yukarı doğru oluşturulmuştur. Kulak kalıbı modellerinin yazıcı platformu üzerinde katmanlı olarak üretilme süreci Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Aşağıdan yukarıya baskı tekniği, reçine tüketiminin azaltılması ve karmaşık geometrilerin yüksek hassasiyetle üretilmesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Tez kapsamında kullanılan baskı parametreleri, kulak kalıbı geometrisinin boyutsal doğruluğunu, yüzey kalitesini ve katmanlar arası bağlanma bütünlüğünü sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu doğrultuda, tabaka (katman) yüksekliği $50 \mu m$ olarak ayarlanmıştır. Bu katman kalınlığı, DLP sistemler için literatürde önerilen aralıkta olup, özellikle medikal uygulamalarda yüksek yüzey kalitesi ve geometrik

hassasiyet sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Kulak kalıbı modellerinin 3D yazıcıda aşağıdan yukarı tekniğiyle basılması.

Fotopolimer reçinenin yeterli düzeyde kürlenmesini sağlamak amacıyla, taban pozlandırma için UV ışığa maruziyet süresi 30 saniye ve katmanlar arası pozlandırma ise 5 saniye olarak ayarlanmıştır. Pozlama süresinin bu aralıkta seçilmesinin temel nedeni, TiO_2 nanopartiküllerinin ışık saçılımına neden olabilme potansiyelini dengelemek ve her bir katmanın homojen biçimde kürlenmesini sağlamaktır. Ayrıca, yazıcının ışık şiddeti %150 olarak ayarlanmış ve tüm baskı işlemlerinde bu değer sabit tutulmuştur.

Tez kapsamında yalnızca kulak kalıbı numuneleri değil, aynı zamanda mikrobiyolojik testler ve mekanik/malzeme karakterizasyonu için 6 mm çap \times 2 mm kalınlıkta dairesel diskler ile çekme testi için köpek kemiği şeklinde numuneler aynı baskı parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Tüm numunelerde aynı baskı koşullarının uygulanmasıyla, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Baskı işlemleri tamamlandıktan sonra üretilen numuneler yazıcı platformundan dikkatlice ayrılmış, baskı hatası, katman ayrılması veya geometrik bozulma içeren örnekler değerlendirme dışı bırakılmıştır.

3.4. Fiziksel, Yapısal, Termal ve Kimyasal Karakterizasyon

Bu tez kapsamında üretilen TiO_2 katkılı kulak kalıbı numunelerinin fiziksel, yapısal, termal ve kimyasal özellikleri; yüzey pürüzlülüğü, morfoloji, ısıl davranış ve kimyasal yapı analizleri ile karakterize edilmiştir. Gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları, TiO_2 katkı oranının malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek

amacıyla sistematik olarak yürütülmüştür.

3.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Bu çalışmada numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.6'da gösterilen Time TR 200 model profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numune grubundan üç adet örnek seçilmiş, her bir örnek üzerinde beş farklı noktadan ölçüm alınmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması yüzey pürüzlülüğü değeri olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Time TR 200 model profilometre cihazı.

3.4.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi

Bu çalışmada üretilen TiO₂ katkılı fotopolimer kulak kalıbı numunelerinin kimyasal yapısını ve fonksiyonel gruplarını belirlemek amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. FTIR ölçümleri, Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTAM)'da bulunan Bruker Hyperion 3000 marka FTIR spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Analizler, oda sıcaklığında ve 4000–400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiş olup, her numune için spektrumlar aynı ölçüm koşulları altında kaydedilmiştir. Elde edilen FTIR spektrumları, saf fotopolimer reçine ve TiO₂ katkılı numuneler karşılaştırılarak değerlendirilmiş; Ti–O bağlarına ait karakteristik pikler ile polimer matrisin fonksiyonel gruplarındaki olası değişimler incelenmiştir. Bu analizler sayesinde TiO₂ nanopartiküllerinin fotopolimer yapı içerisindeki varlığı ve kimyasal etkileşimleri ortaya konulmuştur.

3.4.3. Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA)

Bu çalışmada, TiO₂ nanopartikülleri içeren kulak kalıbı numunelerinin ısı

davranışını ve termal kararlılığını incelemek amacıyla Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Hitachi STA 7300 marka Termogravimetrik Analiz (TG) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) gerçekleştirilmiştir. TG/DTA analizleri için kulak kalıbı numunelerinden alınan küçük bir miktar parça, öğütme işlemi ile toz hâline getirilmiştir. Elde edilen toz numuneler, analiz öncesinde platin kroze içerisine yerleştirilmiştir.

TG/DTA ölçümleri, nitrojen atmosferi (50 mL/dk) altında gerçekleştirilmiş olup, numuneler 25–300 °C sıcaklık aralığında 10 °C/dk ısıtma hızında analiz edilmiştir. Termogravimetrik analiz ile sıcaklığa bağlı kütle değişimleri incelenerek numunelerin termal bozunma davranışı değerlendirilmiştir. Diferansiyel termal analiz (DTA) sonuçları kullanılarak ise numunelere ait camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristallenme sıcaklığı (T_c) ve yumuşama sıcaklığı (T_s) gibi kritik termal geçiş noktaları belirlenmiştir. Bu analizler sayesinde TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin termal özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

3.4.4. İndüktif Eşleşmiş Plazma (ICP) Analizi

Bu çalışmada, farklı oranlarda TiO₂ katkısı içeren kulak kalıbı numunelerinden yapay ter ortamına salınan titanyum iyon miktarları, indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) kullanılarak belirlenmiştir (Aktas vd., 2025). Analizler, kulak kanalı koşullarını taklit edecek şekilde tasarlanan ekstraksiyon deneyleri sonrasında gerçekleştirilmiştir.

TiO₂ katkılı kulak kalıbı numuneleri, ISO 10993-12 doğrultusunda 3 cm²/mL yüzey alanı/hacim oranı sağlanacak şekilde, pH = 6.5 olan ve kulak kanalı ortamını temsil eden yapay ter çözeltisi içerisine daldırılmıştır (International Organization for Standardization, 2021). Numuneler iki ayrı deney seti halinde hazırlanmıştır. Birinci set, kısa süreli iyon salımını değerlendirmek amacıyla 24 saat (1 gün), ikinci set ise uzun süreli iyon salım davranışını incelemek amacıyla 14 gün boyunca inkübasyona bırakılmıştır.

Ekstraksiyon işlemleri, 37 °C sıcaklıkta ve 80 rpm çalkalama hızına sahip inkübatörde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sürelerin sonunda ekstraksiyon çözeltileri toplanmış ve çözelti içerisindeki titanyum iyon konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla ICP-MS analizine tabi tutulmuştur. ICP-MS ölçümleri, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde hizmet alımı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ppb (µg/L) birimi cinsinden raporlanmıştır.

3.5. Çekme Testi ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Çekme testleri, TiO₂ katkılı ve katkısız fotopolimer numunelerin çekme dayanımı, elastik davranışı ve kopma özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM D3039 standartına uygun olarak hazırlanmış köpek kemiği (dog-bone) geometrisine sahip numuneler üzerinde uygulanmıştır. Numunelerin boyutları, önceki bölümde belirtilen baskı parametrelerine uygun şekilde üretilmiştir.

Çekme deneyleri, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan üniversal çekme test cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında ve sabit bir çapraz kafa hızı altında gerçekleştirilmiştir. Test sırasında uygulanan kuvvet ve buna karşılık gelen uzama değerleri cihaz yazılımı aracılığıyla sürekli olarak kaydedilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden numunelerin çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması gibi temel mekanik parametreleri hesaplanmıştır.

Her numune grubundan en az beş adet örnek test edilmiş ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemsel yaklaşım ile, TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin mekanik performansı üzerindeki etkileri güvenilir ve karşılaştırılabilir biçimde ortaya konulmuştur.

3.6. Biyolojik Testler

3.6.1. İn vitro sitotoksosite analizi

Bu çalışmada, farklı oranlarda titanyum dioksit (TiO₂) katkısı içeren kulak kalıbı örneklerinin in vitro sitotoksik etkileri, NIH/3T3 fibroblast hücre hattı (ATCC CRL-1658) kullanılarak metabolik aktiviteye dayalı floresans/kolorimetrik prensiple çalışan Alamar Blue hücre canlılığı testi ile değerlendirilmiştir. Deneyler, biyomalzemelerin biyoyumluluk değerlendirilmesine yönelik uluslararası standartlar dikkate alınarak MEM elüsyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (International Organization for Standardization, 2009).

Sitotoksosite analizlerinde kullanılacak TiO₂ katkılı kulak kalıbı numuneleri, hücre kültürü deneylerine uygun olacak şekilde etanol ve otoklavlanmış saf su ile yıkanmış; ardından tüm numune yüzeyleri en az 1 saat UV ışınına maruz bırakılarak sterilize edilmiştir. Sterilizasyon işlemi sonrası numuneler steril koşullar

altında muhafaza edilmiştir. Sterilize edilen numuneler, hücre kültürü ortamı içerisinde uygun yüzey alanı/hacim oranı (3cm²/mL) esas alınarak inkübasyona bırakılmıştır (International Organization for Standardization, 2021). Ekstraktlar, kısa ve uzun süreli olası biyolojik etkilerin değerlendirilebilmesi amacıyla 24 saat ve 14 gün süreyle hazırlanmıştır. Ekstraksiyon işlemi, 37 °C sıcaklıkta ve %5 CO₂ içeren nemlendirilmiş inkübatör ortamında gerçekleştirilmiştir. Süre sonunda elde edilen ekstraktlar hücre deneylerinde kullanılmak üzere ayrılmıştır.

Sitotoksisite değerlendirmelerinde fare embriyonik fibroblast hücre hattı olan NIH3T3 hücreleri kullanılmıştır. Hücreler, standart hücre kültürü koşullarında (37°C, %5 CO₂, nemlendirilmiş atmosfer) %10 fetal bovin serum (FBS) ve %1 Penisillin/Streptomisin ilave edilmiş DMEM/F12 mediumu ile kültüre edilmektedir. Deneyler, hücrelerin logaritmik büyüme fazında gerçekleştirilmiştir. Hücreler, deney öncesinde 96 kuyucuklu hücre kültürü plakalarına 3×10^3 hücre/kuyucuk yoğunluğunda ekilmiş ve 24 saat sonra TiO₂ katkılı numunelerden elde edilen 24 saatlik ve 14 günlük ekstraktlar ile 24 saat boyunca muamele edilmiştir. Negatif kontrol grubunda hücreler yalnızca taze hücre kültürü ortamı ile inkübe edilmiştir. Pozitif kontrol grubu olarak ise sitotoksik etki oluşturduğu bilinen 2 mM ZnSO₄ içeren hücre kültürü ortamı kullanılmıştır (Aktas vd., 2025; Melik vd., 2025; Gumushan Aktas vd., 2025).

İnkübasyon süresi sonunda, hücre kültürü ortamına 1:10 oranında Alamar Blue reaktifi eklenmiş ve 4 saat sonra hücrelerin metabolik aktivitesine bağlı olarak oluşan renk değişimi mikropłaka okuyucu kullanılarak 570 ve 600nm dalga boylarında ölçülmüştür.

Elde edilen ölçüm sonuçlarından (absorbanslar) aşağıdaki Denklem (3.1) ile canlılık oranını gösteren % indirgenme değerleri hesaplanmıştır. Ardından negatif kontrol grubunun %indirgenme değeri 100 kabul edilerek diğer grupların hücre canlılığı normalize edilmiştir.

$$\text{indirgenme}(\%) = 100 \times \frac{(117.216 \times A_{570} - 80.586 \times A_{600})}{(155.677 \times NC_{600} - 14.652 \times NC_{570})} \quad (3.1)$$

A_{570} : Kontrol ve deney gruplarında 570 nm dalga boyunda ölçülen absorbans değeri

A_{600} : Kontrol ve deney gruplarında 600 nm dalga boyunda ölçülen absorbans

değeri

NC₅₇₀: Negatif Kontrol (sadece medium + AB) grubunda 570 nm dalga boyunda ölçülen absorbans değeri

NC₆₀₀: Negatif Kontrol (sadece medium + AB) grubunda 600 nm dalga boyunda ölçülen absorbans değeri

3.6.2. Antibakteriyel Testler

Üretilen numunelerin antimikrobiyal özellikleri, numune yüzeyine tutunan bakterilerin kantitatif olarak belirlendiği canlı sayım tekniği ile değerlendirilmiştir. Test bakterileri olarak sıklıkla kulak enfeksiyonuna sebep olduğu rapor edilen Gram-pozitif *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) ve Gram-negatif *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853) bakteri türleri kullanılmıştır. Bakteriyal adezyon denemesi, literatürdeki canlı sayım tekniği (Aktas vd., 2025; Aktas ve ark., 2025b) hafifçe modifiye edilecek şekilde uygulanmıştır. Kısaca; test bakterilerinin 1 gecelik taze kültürleri hazırlanmış ve Fizyolojik Tuzlu Su (FTS; %0.85, w/v) içerisinde hücre süspansiyonları 0.5 McFarland (OD600 nm) olacak şekilde bir spektrofotometre (MultiScanGo, Thermo Scientific) aracılığıyla 600 nm dalga boyu kullanılarak ayarlanmıştır. Steril Tryptic Soy Broth (TSB) ile hücre süspansiyonları 1:10 oranında seyreltilmiş ve bu inokulumun 1 mL'si 24 kuyucuklu steril plakalara aseptik koşullar altında transfer edilmiştir. UV ile sterilizasyonu gerçekleştirilmiş disk şeklindeki kulak kalıbı numuneleri ilgili kuyucuklara transfer edilmiş ve bakteriyal adezyon denemesi için 35 °C'de 15 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresi bitiminde tutunmayan bakterilerin uzaklaştırılması için numuneler yıkanmış ve steril PBS (Gibco) içeren tüplere aktarılmıştır. Numunelere tutunan bakterilerin kazanımı için tüpler sırasıyla ultrasonikasyon ve vortekslemeye tabi tutulmuştur. Serbest bakterileri içeren PBS sıvısının 1 mL'si kullanılarak seri dilüsyonlar hazırlandıktan sonra her dilüsyondan dökme plaka tekniği ile steril petrilere 1 mL örnek aktarılmıştır. Steril Tryptic Soy Agar (TSA) ilave edilerek karıştırılan petrilere besiyerinin katılması sonrasında 35 °C'de 24-48 saat inkübasyona bırakılmıştır. 30-300 aralığındaki kolonileri içeren petrilere sayılmış ve bir diskte tutunan bakteri sayısı koloni oluşturan birim (CFU)/Disk olarak hesaplanmıştır. Denemeler 3 tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama değerleri standart saplaması ile verilmiştir.

3.7. İstatistiksel Değerlendirme

Deneyler en az üç tekrar halinde gerçekleştirilmiş, her deney için en az 3

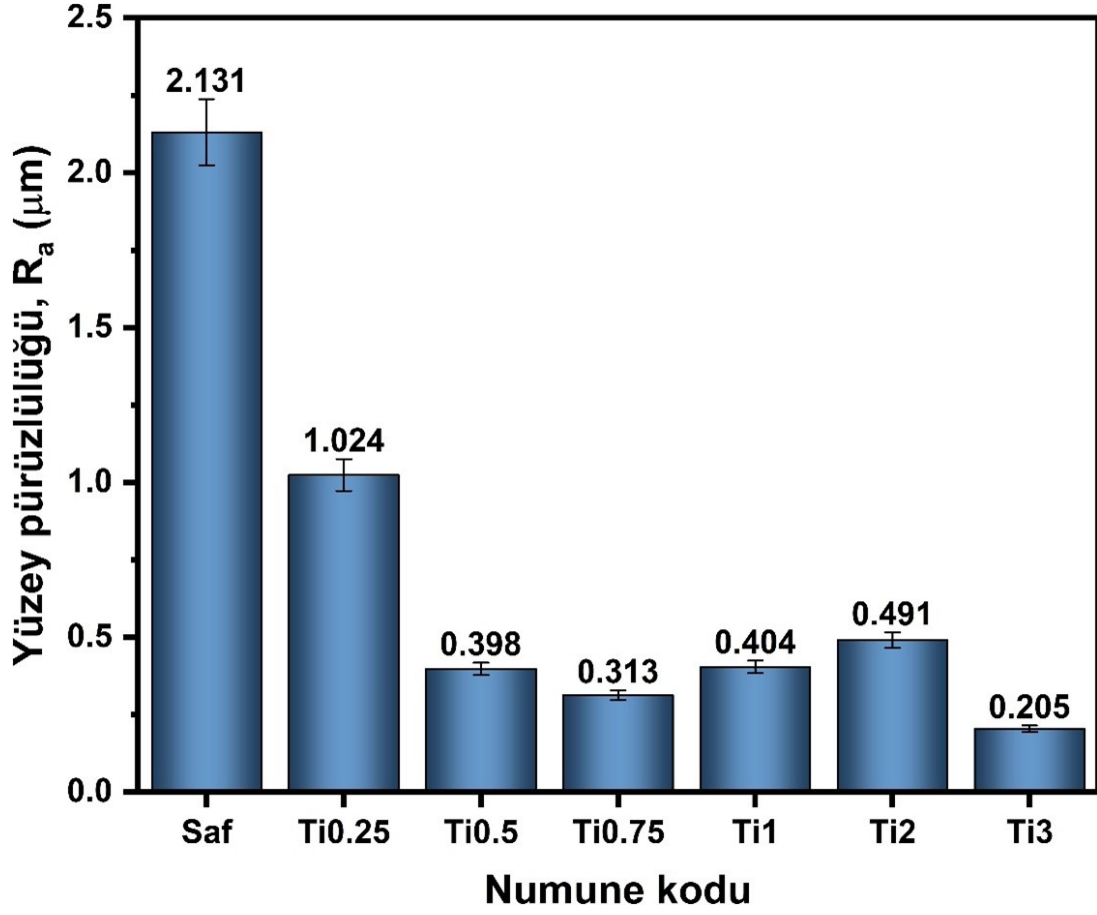
numune kullanılmıştır. Sonuçlar grup ortalaması \pm standart hata şeklinde sunulmuştur. Elde edilen veriler OneWay ANOVA varyans analizi ile test edilmiş, gruplar arasındaki farklılıklar Student's t testi ile değerlendirilmiştir. $p < 0.05$ istatistiksel bakımdan anlamlı kabul edilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. TiO₂ Katkısının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 4.1’de, DLP tabanlı üç boyutlu yazıcı ile üretilen saf fotopolimer reçine ve farklı oranlarda TiO₂ nanopartikül içeren kulak kalıbı numunelerine ait ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, TiO₂ nanopartikül katkı oranının numunelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Saf fotopolimer reçine ile üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğü 2.131 µm olarak ölçülmüştür. TiO₂ nanopartikül katkısının düşük oranlarda ilave edilmesiyle yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. %0.25 TiO₂ katkılı numunede Ra değeri 1.024 µm, %0.5 TiO₂ katkılı numunede 0.398 µm ve %0.75 TiO₂ katkılı numunede 0.313 µm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, düşük ve orta düzey TiO₂ katkılarının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. TiO₂ katkı oranının %1’e çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü 0.404 µm olarak ölçülmüş, %2 TiO₂ katkılı numunede ise bu değer 0.491 µm’ye yükselmiştir. Bu artış, artan nanopartikül içeriğine bağlı olarak fotopolimer matris içerisinde meydana gelen lokal aglomerasyon ve DLP baskı sürecinde ışık saçılımının artmasıyla ilişkilendirilmektedir. Buna karşın, %3 TiO₂ katkılı numunede yüzey pürüzlülüğünün 0.205 µm ile en düşük değere ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TiO_2 nanopartikül ilavesinin saf fotopolimer reçineye kıyasla yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri %0.75 ve %3 TiO_2 katkılı numunelerde elde edilmiştir. Bu bulgular, DLP tabanlı 3B baskı ile üretilen kulak kalıbı numunelerinde yüzey morfolojisinin TiO_2 katkı oranına duyarlı olduğunu ve uygun katkı oranlarının yüzey kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir.

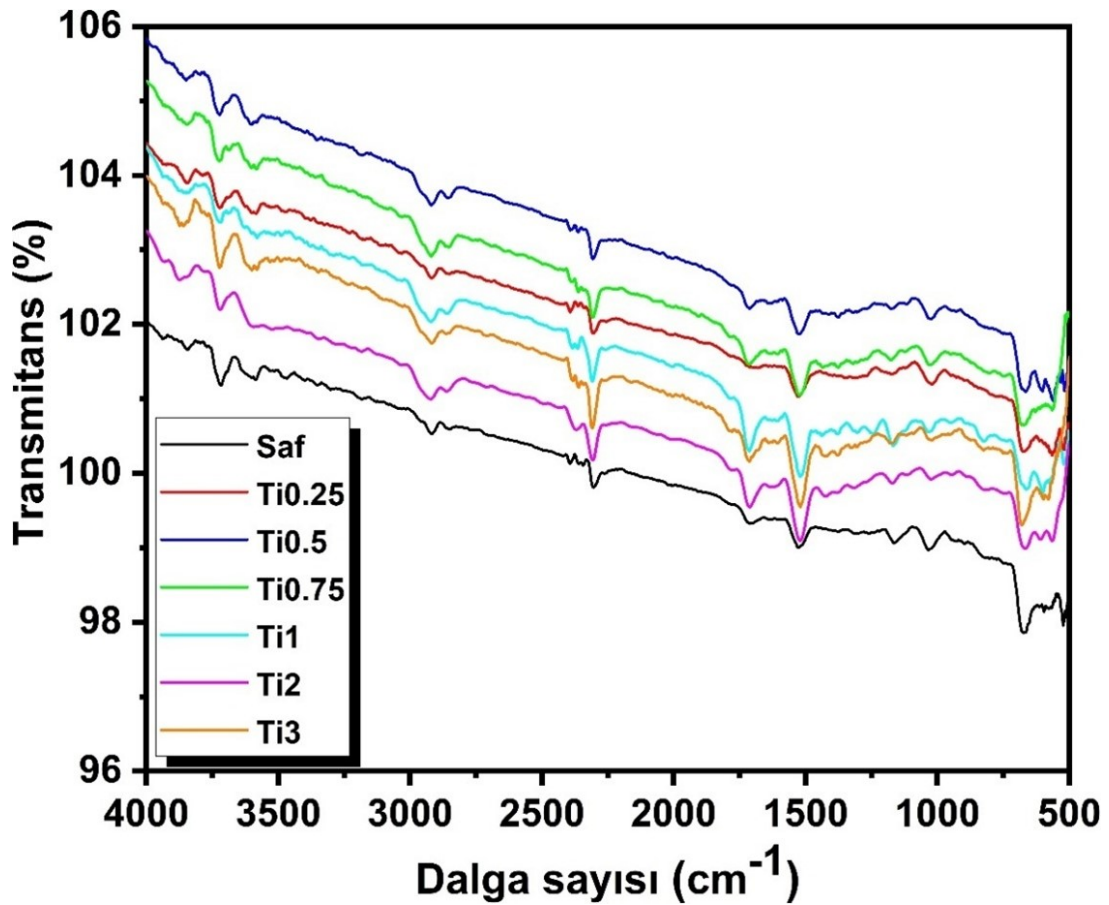
4.2. FT-IR Analizi Bulguları

Şekil 4.2’de katkısız (saf) ve TiO_2 katkılı numunelere ait FT-IR spektrumları sunulmaktadır. Saf fotopolimer numuneye ait spektrumda, yaklaşık 1720 cm^{-1} , 1527 cm^{-1} ve 1130 cm^{-1} bantları sırasıyla ester grubu $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$ ve $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ / $\text{C}-\text{O}$ gerilme titreşimleri ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} civarında gözlenen bantlar, polimer yapıya ait $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ gruplarının karakteristik titreşimlerini göstermektedir.

TiO_2 katkılı numunelerin FT-IR spektrumlarında, özellikle $500-800\text{ cm}^{-1}$

aralığında yeni ve belirgin absorpsiyon bantlarının oluştuğu görülmüştür. Bu bantlar Ti–O–Ti ve Ti–O bağ titreşimlerine karşılık gelmekte olup, TiO₂ nanopartiküllerinin polimer matris içerisinde bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca 1428 cm⁻¹ civarında gözlenen piklerde katkı oranına bağlı olarak şiddet değişimleri tespit edilmiştir.

Ana polimer yapıya ait karakteristik piklerin tüm TiO₂ katkı oranlarında korunması, fotopolimer matrisin kimyasal iskeletinin bozulmadığını ve TiO₂ ilavesinin yapıya fiziksel olarak dâhil olduğunu ortaya koymaktadır. FT-IR spektrumlarında gözlenen bant konumları ve genel spektral dağılım, TiO₂ katkılı numunelerin kimyasal bileşiminde yeni fonksiyonel gruplar oluşmadan, kompozit bir yapı meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Katkısız ve Titanyum katkılı örneklerin FTIR grafiği

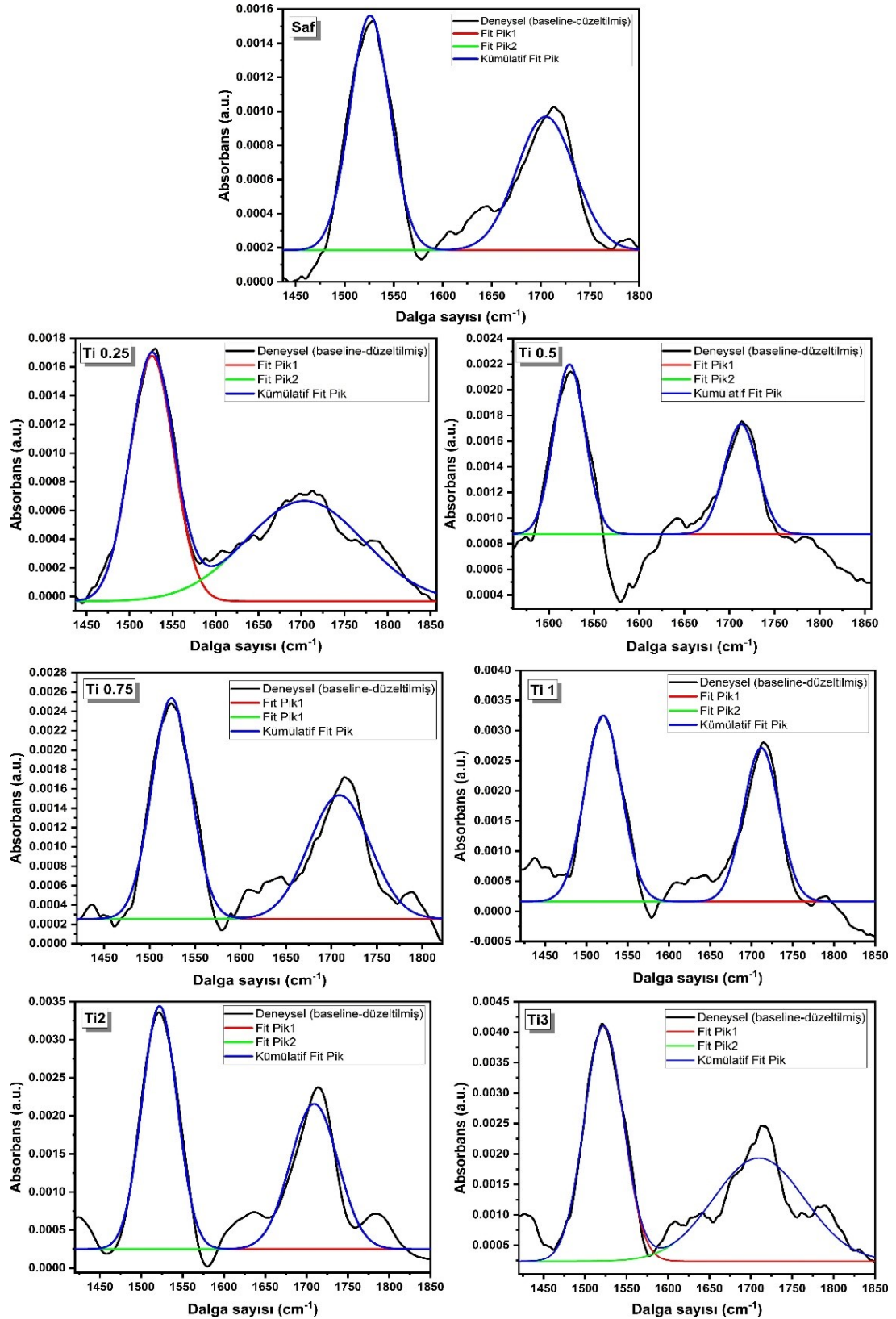
Şekil 4.3 ve Tablo 4.1’de, numunelere ait temel çizgi düzeltmesi yapılmış FTIR spektrumlarının Gauss ayrıştırmasıyla elde edilen C=C ve C=O bantlarının entegre alan oranları sunulmuştur. Saf ve Ti katkılı numunelerin FT-IR spektrumları, C=C ve C=O titreşim modlarının bağlı katkılarını değerlendirmek amacıyla 1450–1850 cm⁻¹ bölgesinde Gaussian pik uyarlaması ile analiz edilmiştir. C=C

gerilme titreşimi $\sim 1522\text{--}1526\text{ cm}^{-1}$ 'de iken, C=O titreşimi $\sim 1703\text{--}1712\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlemlenmiştir; bu da polimer matrisinin ana kimyasal fonksiyonlarının Ti ilavesiyle korunduğunu göstermektedir.

Gauss uyumundan elde edilen tepe alanları, $A(\text{C}=\text{C})/A(\text{C}=\text{O})$ oranını hesaplamak için kullanıldı. Saf ve Ti katkılı örneklerde bu oran düzensiz bir şekilde değişmektedir. Bu değişiklikler, Ti-O etkileşimlerine ve bunların C=C ve C=O gruplarının dağılımı üzerindeki etkisine, ayrıca çapraz bağ yoğunluğundaki olası değişikliklere veya karbonil gruplarının koordinasyon kaynaklı polarizasyonuna bağlanabilir. Polimer yapısı Ti içeriğiyle doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir.

Ti 0.25 için oran belirgin biçimde azalırken, Ti 0.5–Ti 1 oranlarında artış göstermekte, Ti 3 te ise tekrar düşüş eğilimi gözlenmektedir. Bu tür düzensiz değişim, Ti içeren polimer sistemleri için beklenen ve literatürle uyumlu bir davranıştır. Ti 0.25 için $A(\text{C}=\text{C})/A(\text{C}=\text{O})$ oranının 1'in altına düşmesi, C=C bağlarının önemli ölçüde tüketildiğini ve polimerizasyon/çapraz bağlanmanın arttığını göstermektedir. Bu örnek için C=O bandının göreceli olarak baskın hale gelmiş olup, Ti'nin reaksiyon kinetiğini hızlandırıcı veya ağ yapısını güçlendirici rol oynadığı düşünülmektedir. Düşük Ti miktarlarında Ti–O etkileşimleri ve karbonil gruplarıyla olası koordinasyonlar, zincir hareketliliğini artırarak C=C bağlarının tüketimini kolaylaştırabilmektedir. Orta Ti derişimlerinde ise lokal çapraz bağ yoğunluğunun artması ve sterik kısıtlamalar, C=C gruplarının daha az reaksiyona girmesine yol açabilmektedir. Yüksek Ti içeriklerinde ise Ti–O–Ti kümelenmeleri, fiziksel ağ oluşumu ve karbonil gruplarının polarizasyonunun artması, C=O bantlarının bağıl katkısını güçlendirerek $A(\text{C}=\text{C})/A(\text{C}=\text{O})$ oranının yeniden azalmasına neden olmaktadır (Vouvoudi vd., 2022). $A(\text{C}=\text{C})/A(\text{C}=\text{O})$ oranlarındaki değişimler, belirsizlikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve Ti içeriğiyle düzenli olmayan değişimler gözlemlenmiştir.

Ti içeriği arttıkça pik pozisyonlarının çok az kaymasının lokal çevre değişimi, hidrojen bağları ve metal–oksijen etkileşimlerinden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir. Bir miktar kayma olmasına rağmen çok büyük bir kaymanın olmaması, ana fonksiyonel grupların korunduğunu göstermektedir (Alharbi vd., 2025).



Şekil 4.3. Temel çizgi düzeltmesi uygulanmış FTIR spektrumlarının Gauss ayrıştırması sonucunda belirlenen C=C ve C=O bantlarına ait spektrumlar.

Çizelge 4.1. Temel çizgi düzeltmesi uygulanmış FTIR spektrumlarının Gauss ayırması sonucunda belirlenen C=C ve C=O bantlarına ait entegre alan oranları.

Numune kodu	C=C pik pozisyonu (cm ⁻¹)	C=O pik pozisyonu (cm ⁻¹)	A(C=C)	A(C=O)	A(C=C)/A(C=O)
Saf	~1525	~1704	0,07047 ± 0,01503	0,0579 ± 0,01818	1.22± 0.46
Ti0.25	~1526	~1703	0,10959 ± 0,01522	0,12029 ± 0,02458	0.91± 0.22
Ti0.5	~1522	~1712	0,05683 ± 0,01177	0,03978 ± 0,01224	1.43± 0.53
Ti0.75	~1524	~1709	0.1228 ± 0.0270	0.1076 ± 0.0341	1.14 ± 0.44
Ti1	~1520	~1711	0,17191 ± 0,02934	0,1377 ± 0,02889	1.25±0.34
Ti2	~1523	~1708	0,16993 ± 0,02201	0,13723 ± 0,02574	1.24 ± 0.28
Ti3	~1522	~1709	0,22741 ± 0,03553	0,23319 ± 0,05551	0.98 ± 0.28

4.3. TG/DTA Analizi Bulguları

TiO₂ katkılı ve katkısız kulak kalıbı numunelerinin TG/DTA/DTG eğrileri Şekil 4.4'te verilmiştir. Tüm numunelerde TG eğrileri düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 250 °C altı) büyük ölçüde kararlı seyretmekte, sıcaklık yükseldikçe kütle kaybı hızlanmakta ve ana bozunma bölgesinde keskin bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 4.4). Bu durum fotopolimer matrisin çok kademeli bozunma karakterine işaret etmektedir.

DTG eğrileri tüm örneklerde üç belirgin maksimum göstermekte olup, bu maksimumlar (T_{max}) bozunma mekanizmasının kademeli ilerlediğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.4 üzerinde işaretlenen DTG maksimum sıcaklıkları Çizelge 4.2'de verilmektedir.

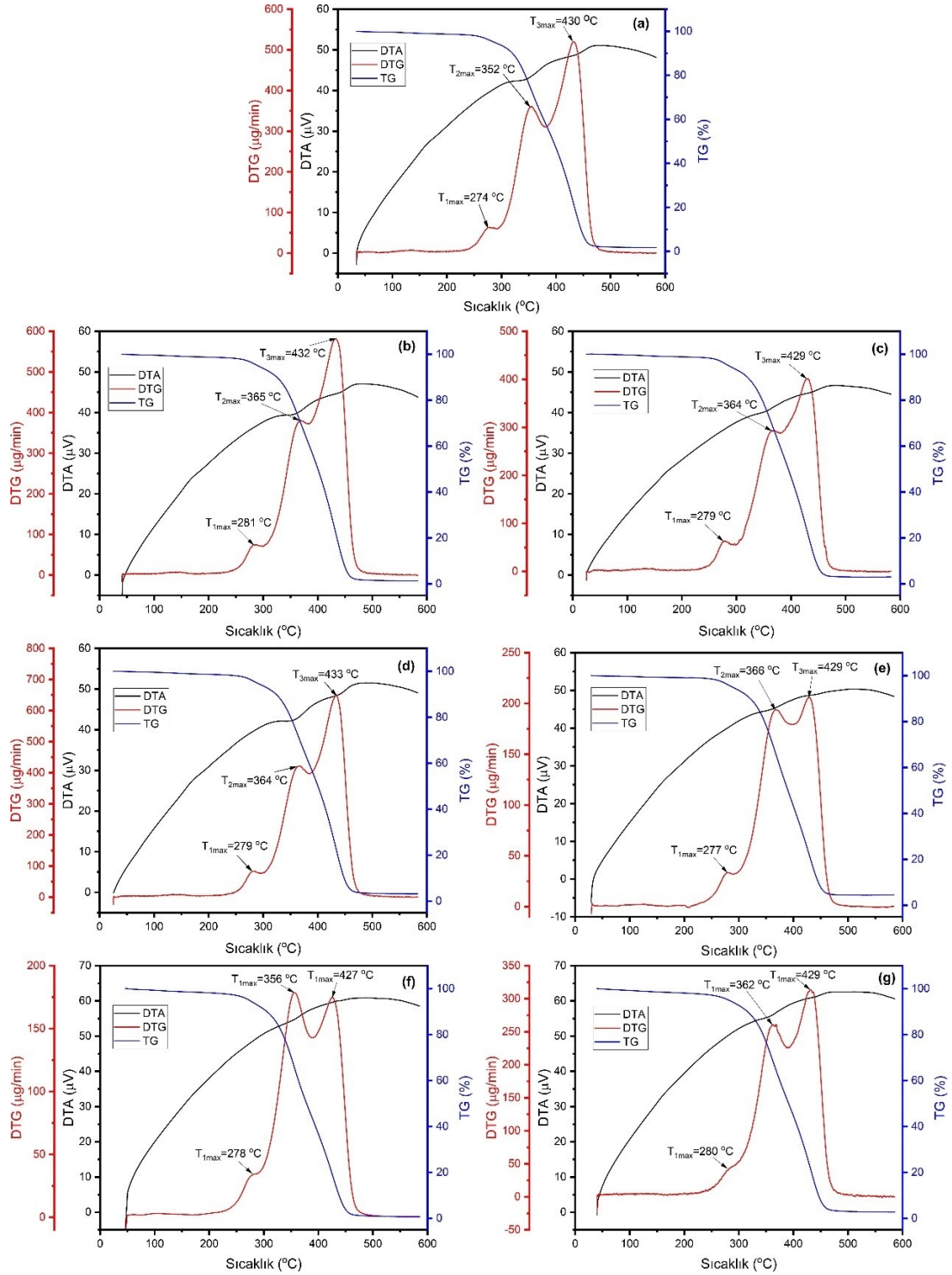
Çizelge 4.2. Saf ve TiO₂ Katkılı numunelere ait DTG maksimum bozunma sıcaklıkları.

Numune	T _{1max} (°C)	T _{2max} (°C)	T _{3max} (°C)
Saf	274	352	430
Ti0.25	281	365	432
Ti0.50	279	364	429
Ti0.75	279	364	433
Ti1	277	366	429
Ti2	278	356	427
Ti3	280	362	429

Bu üç kademeli yapı; (i) daha düşük sıcaklıkta düşük şiddetli ilk kayıp ($T_{1max} \sim 274-281$ °C), (ii) orta sıcaklıkta hızlanan ara bozunma ($T_{2max} \sim 352-366$ °C) ve (iii) en yüksek şiddetli ana bozunma basamağı ($T_{3max} \sim 427-433$ °C) şeklinde özetlenebilir. Ana kütle kaybının T_{3max} civarında gerçekleşmesi, fotopolimer ağ yapısının ana zincir/parçalanma süreçlerinin bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir (Şekil 4.4).

Saf numune ile karşılaştırıldığında TiO_2 katkılı numunelerde özellikle T_{2max} değerlerinin genel olarak daha yüksek sıcaklıklara kayması (ör. 352 °C \rightarrow $364-366$ °C bandı), ara bozunma basamağında kısmi bir termal stabilizasyon olduğunu düşündürmektedir. Benzer şekilde T_{1max} değerleri de katkıyla birlikte sınırlı düzeyde artış gösterebilmektedir (274 °C \rightarrow $277-281$ °C). Buna karşın yüksek katkı oranlarında (özellikle Ti_2) T_{2max} 'in tekrar daha düşük değere inmesi (356 °C), katkının her durumda stabilizasyon sağlamadığını; dağılım/aglomere yapı veya ısı-transfer/ara-yüz etkileri nedeniyle bozunma davranışının farklılaşabileceğini göstermektedir. Ana bozunma basamağına ait T_{3max} ise tüm gruplarda yakın bir aralıkta ($427-433$ °C) kalarak, ana zincir bozunmasının sıcaklık konumunun TiO_2 katkısından sınırlı düzeyde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

DTA eğrileri, DTG ile eşzamanlı olarak termal olayların yoğunlaştığı bölgeleri desteklemektedir. Özellikle T_2 ve T_3 basamaklarının bulunduğu sıcaklık aralıklarında DTA sinyalindeki belirgin değişimler, bozunma süreçlerinin ısı alışverişiyle (endo/ekzo karakter) birlikte ilerlediğini göstermektedir (Şekil 4.4).

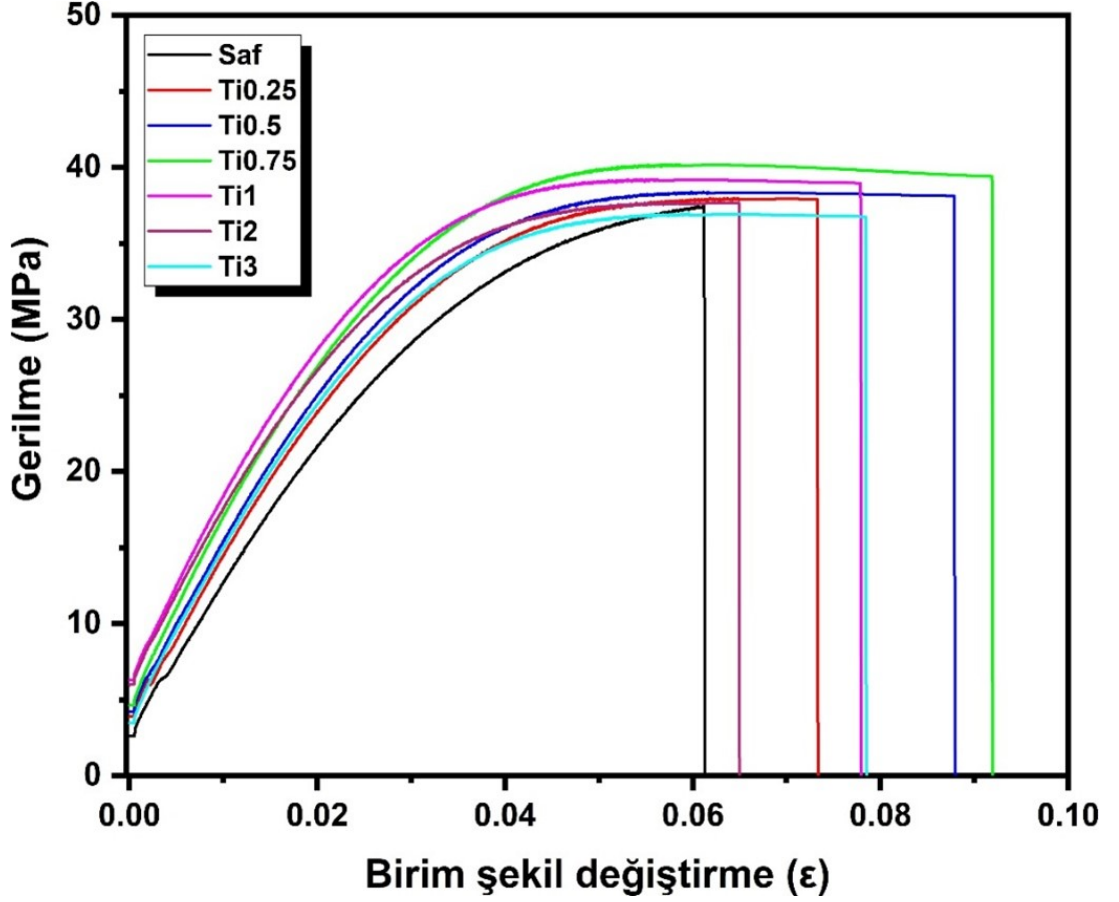


Şekil 4.4. Saf ve farklı oranlarda TiO₂ katkılanmış kulak kalıbı örneklerine ait TG/DTA/DTG analizleri: (a) Saf, (b) %0.25 TiO₂, (c) %0.50 TiO₂, (d) %0.75 TiO₂, (e) %1 TiO₂, (f) %2 TiO₂ ve (g) %3 TiO₂.

4.4. Numunelerin Çekme Davranışına Ait Mekanik Bulgular

TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin mekanik özellikleri

üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çekme testlerine ait sonuçlar Çizelge 4.3'te özetlenmiş, gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.5'te, elastisite modülündeki değişim ise Şekil 4.6'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.5. Numunelere ait çekme testlerinden elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri.

Çizelge 4.3 incelendiğinde, saf fotopolimer reçine numunesinin kopma dayanımının 35.81 ± 1.79 MPa, kopma uzamasının %5.91 ve elastisite modülünün 0.96 ± 0.05 GPa olduğu görülmektedir. TiO_2 nanopartikül ilavesi ile birlikte kopma dayanımında genel bir artış eğilimi gözlenmiştir. %0.25 TiO_2 katkıli numunede kopma dayanımı 38.19 ± 1.91 MPa'a yükselmiş, %0.50 ve %0.75 TiO_2 katkıli numunelerde ise sırasıyla 38.90 ± 1.95 MPa ve 39.09 ± 1.95 MPa değerleri elde edilmiştir. En yüksek kopma dayanımı %0.75 TiO_2 katkıli numunede belirlenmiştir.

TiO_2 katkı oranının %1'e çıkarılmasıyla kopma dayanımı 38.97 ± 1.95 MPa olarak ölçülmüş, daha yüksek katkı oranlarında (%2 ve %3) kopma dayanımının sırasıyla 37.86 ± 1.89 MPa ve 37.16 ± 1.86 MPa değerlerine düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, orta düzey TiO_2 katkılarının çekme dayanımını artırdığını,

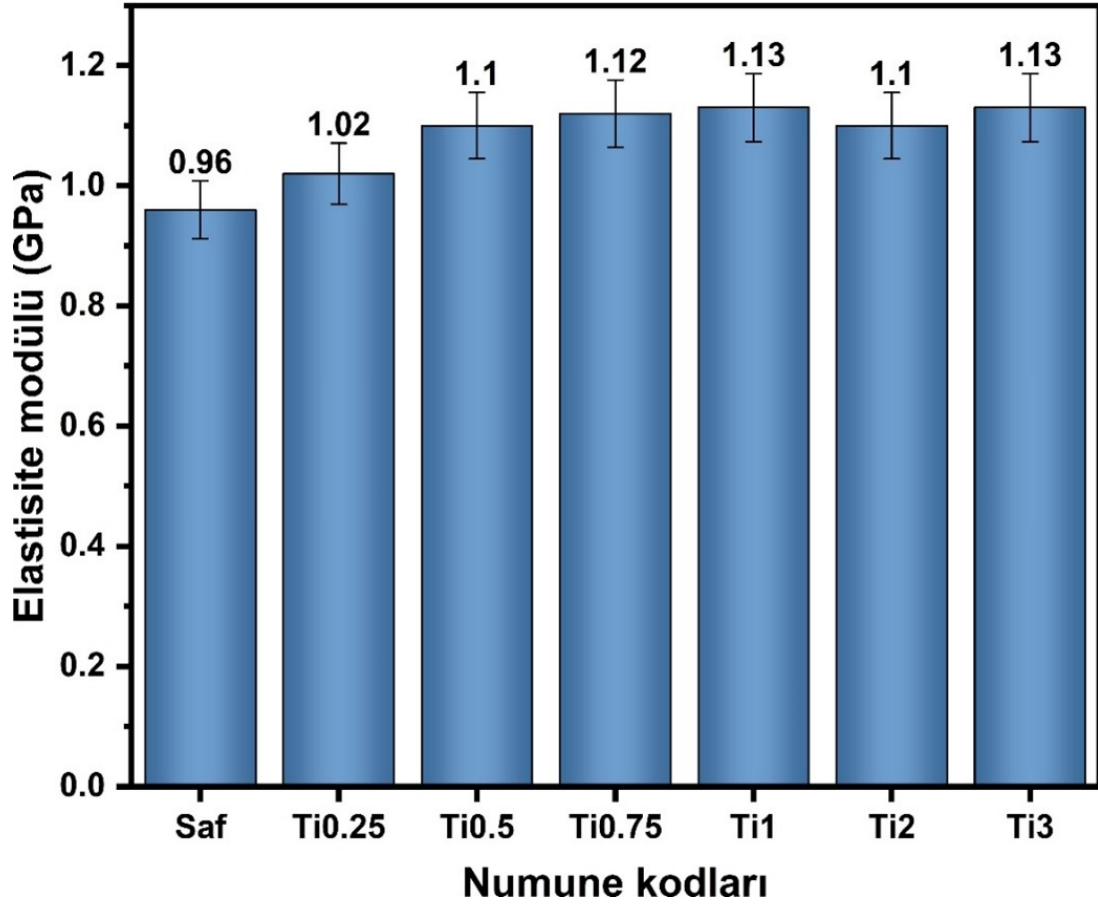
ancak yüksek katkı oranlarında bu artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Kopma uzaması değerleri incelendiğinde, saf numunenin %5.91 olan uzama değerinin, %0.25 TiO₂ katkılı numunede %6.41 ile en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. %0.50, %0.75 ve %1 TiO₂ katkılı numunelerde kopma uzaması sırasıyla %5.92, %6.07 ve %5.61 olarak belirlenmiştir. %3 TiO₂ katkılı numunede ise kopma uzamasının %4.87 ile en düşük değere indiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelere ait çekme testi sonuçları.

Numune kodu	Kopma Dayanımı N/mm ² (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü N/mm ² (GPa)
Saf	35.81±1.79	5.91	0.96±0.05
Ti0.25	38.19±1.91	6.41	1.02±0.05
Ti0.50	38.90±1.95	5.92	1.10±0.06
Ti0.75	39.09±1.95	6.07	1.12±0.06
Ti1	38.97±1.95	5.61	1.13±0.06
Ti2	37.86±1.89	5.64	1.10±0.06
Ti3	37.16±1.86	4.87	1.12±0.06

Numunelerin rijitliğini temsil eden elastisite modülü değerleri, çekme testlerinden elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinin elastik bölgesinden hesaplanmış ve Şekil 4.6’da sunulmuştur. Saf numunenin elastisite modülü 0.96 ± 0.05 GPa iken, TiO₂ katkısı ile birlikte bu değer arttığı görülmektedir. %0.25, %0.50 ve %0.75 TiO₂ katkılı numunelerde elastisite modülü sırasıyla 1.02 ± 0.05 GPa, 1.10 ± 0.06 GPa ve 1.12 ± 0.06 GPa olarak hesaplanmıştır. En yüksek elastisite modülü %1 TiO₂ katkılı numunede 1.13 ± 0.06 GPa olarak belirlenmiştir. Daha yüksek katkı oranlarında elastisite modülünün yaklaşık 1.10–1.12 GPa aralığında seyrettiği görülmektedir.

Şekil 4.5’te verilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri, TiO₂ katkılı numunelerin saf numuneye kıyasla daha yüksek gerilme değerlerine ulaştığını ve elastik bölgedeki eğimlerin TiO₂ katkısı ile arttığını göstermektedir. Bu bulgular, TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin çekme dayanımı ve rijitliği üzerinde belirgin bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. TiO₂ katkısı ile kulak kalıbı malzemesinin elastisite modülündeki değişim.

4.5. TiO₂ katkılı kulak kalıbı numunelerinin iyon salım davranışı

TiO₂ katkılı kulak kalıbı numunelerinden yapay ter çözeltisine salınan titanyum iyon konsantrasyonları, 1 gün ve 14 gün ekstraksiyon süreleri sonunda ICP-MS analizi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Uzun süreli ekstraksiyon sonrası iyon salım eğilimleri ise Şekil 4.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

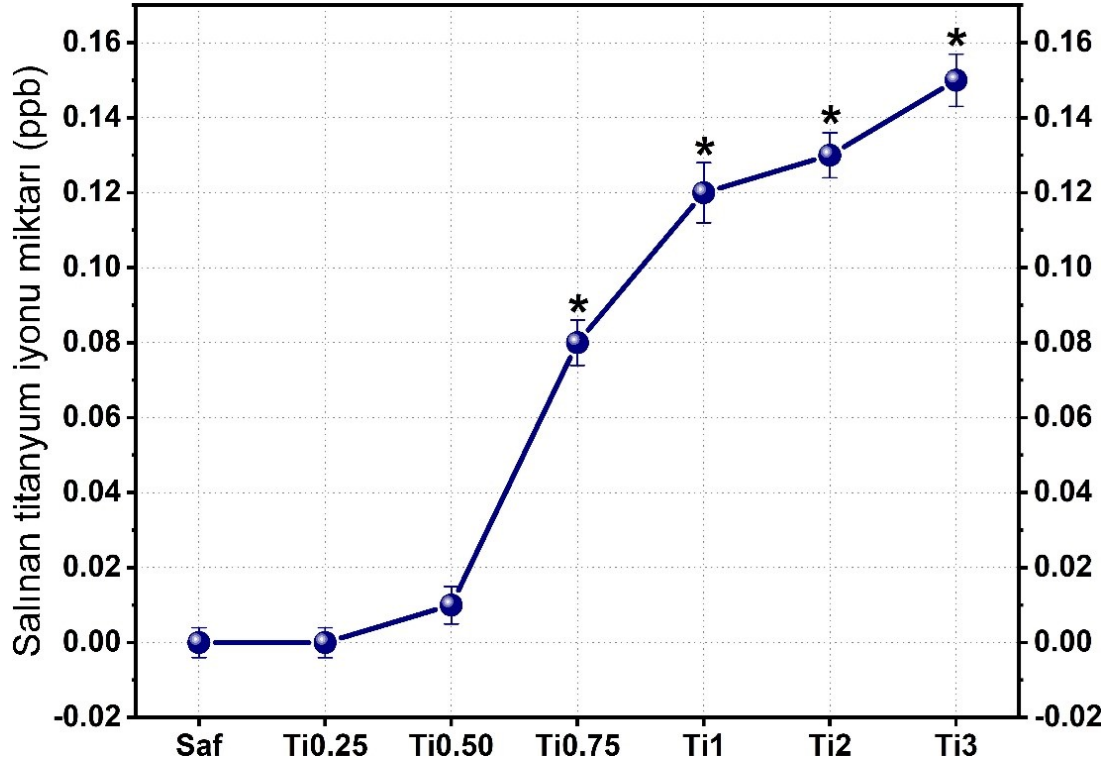
Çizelge 4.4 incelendiğinde, TiO₂ katkılı tüm numunelerde 1 günlük ekstraksiyon süresi sonunda ölçülen titanyum iyonu konsantrasyonlarının, ICP-MS cihazının tespit limitinin altında (<0.02 ppb) kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, kısa süreli temas koşullarında numunelerden ölçülebilir seviyede titanyum iyonu salınımının gerçekleşmediğini göstermektedir.

14 günlük ekstraksiyon süresi sonunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, %0.05 ve daha yüksek oranlarda TiO₂ katkısı içeren numunelerde ölçülebilir düzeyde

titanyum iyonu salınımının gerçekleştiği görülmektedir. Ölçülen titanyum iyonu konsantrasyonları, TiO₂ katkı oranının artmasıyla kademeli bir artış eğilimi sergilemiştir. En düşük iyon salımı Ti0.50 numunesinde 0.01 ppb olarak ölçülürken, Ti0.75, Ti1, Ti2 ve Ti3 numunelerinde sırasıyla 0.08 ppb, 0.12 ppb, 0.13 ppb ve 0.15 ppb değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.7’de sunulan grafik, 14 günlük ekstraksiyon sonrası TiO₂ katkı oranı ile iyon salımı arasındaki artan eğilimi açık şekilde ortaya koymaktadır. Yapılan istatistiksel değerlendirme sonucunda Ti0.75, Ti1, Ti2 ve Ti3 numunelerinden salınan titanyum iyonu miktarlarının Saf numuneye göre anlamlı ($p < 0.05$) düzeyde yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Kulak kalıbı numunelerinin yapay ter çözeltisi içerisinde 1 gün ve 14 gün süreyle ekstraksiyonu sonrası salınan titanyum iyonu konsantrasyonları (ppb). *: Katkısız numuneye (Saf) göre istatistiksel bakımdan anlamlı fark ($p < 0.05$).

Numune kodu	Titanyum iyon konsantrasyonu (ppb)	
	1 gün	14 gün
Saf	0	0
Ti0.25	<0.02	<0.02
Ti0.50	<0.02	0.01
Ti0.75	<0.02	0.08*
Ti1	<0.02	0.12*
Ti2	<0.02	0.13*
Ti3	<0.02	0.15*



Şekil 4.7. Kulak kalıbı numunelerinin yapay ter çözeltisi içerisinde 14 gün süreyle ekstraksiyonu sonrası salınan titanyum iyonu konsantrasyonları (ppb). *: Katkısız numuneye (Saf) göre istatistiksel bakımdan anlamlı fark ($p < 0.05$).

4.6. Titanyum katkılı kulak kalıplarının in vitro sitotoksosite bulguları

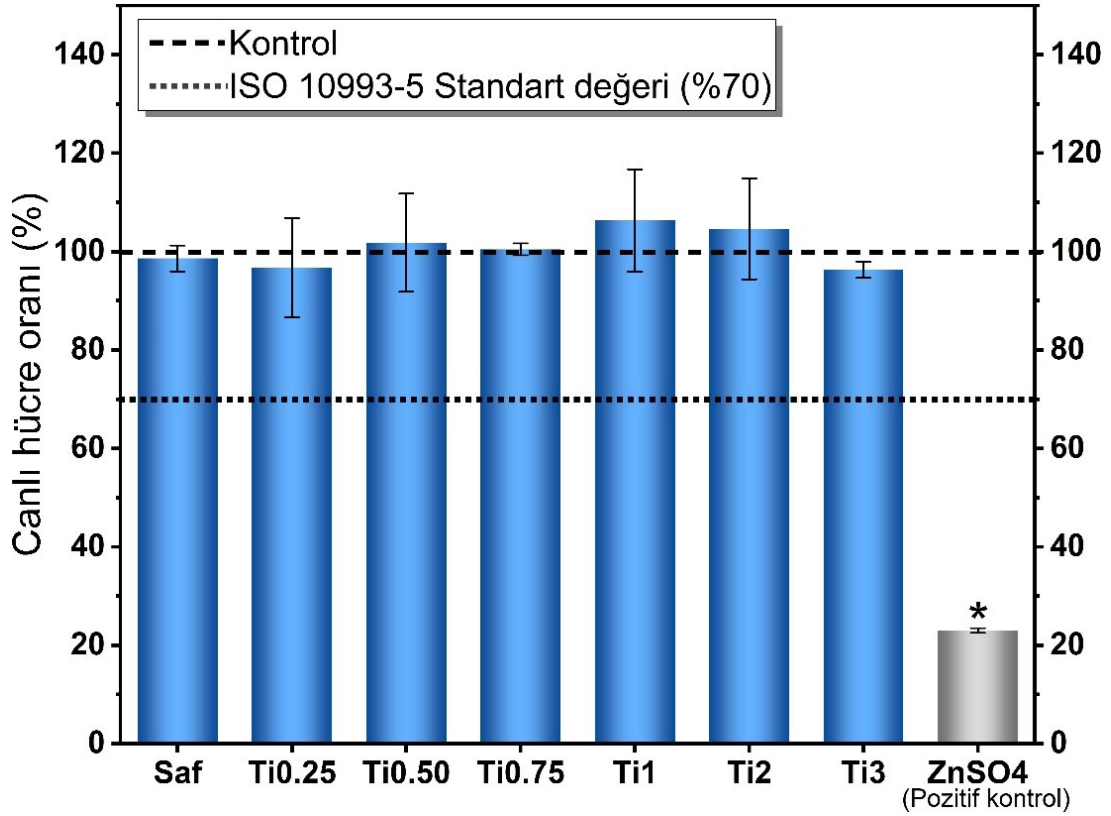
Tez çalışmasının bu bölümünde, farklı oranlarda TiO_2 katkısı içeren kulak kalıbı örneklerinin in vitro sitotoksik etkileri, 24 saatlik ve 14 günlük ekstraksiyon periyotları sonrasında elde edilen ekstraktlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Bölüm 3.6.1’de anlatılan şekilde hazırlanan ekstraktlar, NIH3T3 fibroblast hücrelerine 24 saat uygulanmış, ardından Alamar Blue analizi yapılarak absorbanslar ölçülmüş ve normalize edilmiş canlı hücre oranları (%) hesaplanmıştır. Elde edilen nicel veriler Çizelge 4.5’te sunulmuş, karşılaştırmalı grafiksel gösterimler ise Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.

Kısa süreli maruziyeti temsil eden 24 saatlik ekstraksiyon sonrası elde edilen bulgular incelendiğinde, TiO_2 katkısı içermeyen kulak kalıbı numunesi (Saf) ile artan oranlarda TiO_2 içeren tüm gruplarda hücre canlılığının yüksek seviyelerde seyrettiği ve %96 ila %106 arasında değiştiği görülmüştür (Çizelge 4.5, Şekil 4.8). Özellikle Ti0.50, Ti0.75 ve Ti1 gruplarında canlılık değerlerinin ekstrakt içermeyen kontrol grubuna oldukça yakın olduğu, bazı gruplarda ise %100’ün üzerinde değerler elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum, kısa süreli ekstraksiyon koşullarında TiO_2

katkısının hücre canlılığı veya metabolik aktivite üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.5. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 24 saat ve 14 günlük ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksisite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark ($p < 0.05$).

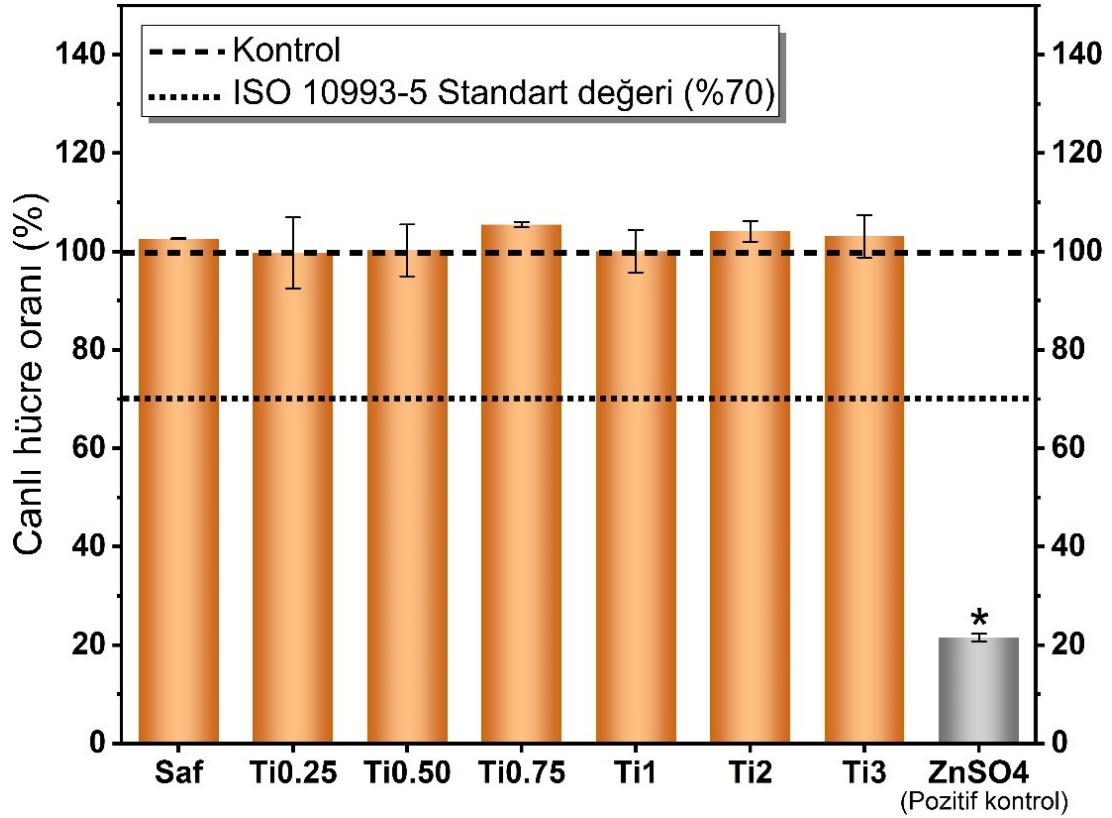
Grup adı	Canlı hücre oranı (%)	
	24 saat	14 gün
Kontrol	100.00 ± 9.04	100.00±6.49
ZnSO₄ (Pozitif kontrol)	23.02 ± 0.47*	21.53±0.79*
Saf	98.62 ± 2.62	102.59±0.09
Ti0.25	96.72 ± 10.07	99.72±7.22
Ti0.50	101.81 ± 9.96	100.24±5.25
Ti0.75	100.46 ± 1.22	105.44±0.55
Ti1	106.34 ± 10.40	100.01±4.36
Ti2	104.63 ± 10.24	104.12±2.09
Ti3	96.33 ± 1.65	103.10±4.31



Şekil 4.8. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 24 saatlik ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksikite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark ($p < 0.05$).

Uzun süreli maruziyeti gösteren 14 günlük ekstraksiyon sonrası elde edilen sonuçlar da 24 saatlik ekstraksiyon bulgularıyla benzer bir eğilim sergilemiştir (Çizelge 4.5, Şekil 4.9). Uzun süreli ekstraksiyon koşullarında TiO_2 katkılı örneklerin tamamında hücre canlılığı %99-105 aralığında ölçülmüştür. Bu bulgular, TiO_2 katkısının, uzun süreli ekstraksiyon sürecinde dahi kulak kalıplarından hücreler üzerinde sitotoksik etki oluşturabilecek seviyede bir bileşen salınımına neden olmadığını ortaya koymaktadır.

Pozitif kontrol olarak kullanılan $ZnSO_4$ uygulanması sonucunda hücre canlılığının belirgin biçimde azalarak ($p < 0.05$, kontrol grubuna göre) canlılık oranlarının yaklaşık %20-25 aralığında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, deney sisteminin sitotoksik etkilere duyarlı olduğunu ve testin geçerliliğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.9. Titanyum takviyeli kulak kalıbı örneklerinin 14 günlük ekstraksiyonu ile yapılan sitotoksosite testi sonucu elde edilen normalize edilmiş canlı hücre oranları (%). *: İstatistiksel bakımdan kontrol grubuna göre anlamlı fark ($p < 0.05$).

Genel olarak değerlendirildiğinde, hem 24 saatlik hem de 14 günlük ekstraksiyon koşullarında TiO_2 katkılı tüm numunelerin hücre canlılık oranlarının kontrole yakın olarak seyrettiği, böylece %70 sitotoksosite sınır değerinin oldukça üzerinde kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, çalışmada üretilen titanyum katkılı kulak kalıbı materyallerinin in vitro koşullarda sitotoksik olmadığını ve hücre sel biyoyumluluk açısından güvenli bir profil sergileyebileceğini göstermektedir.

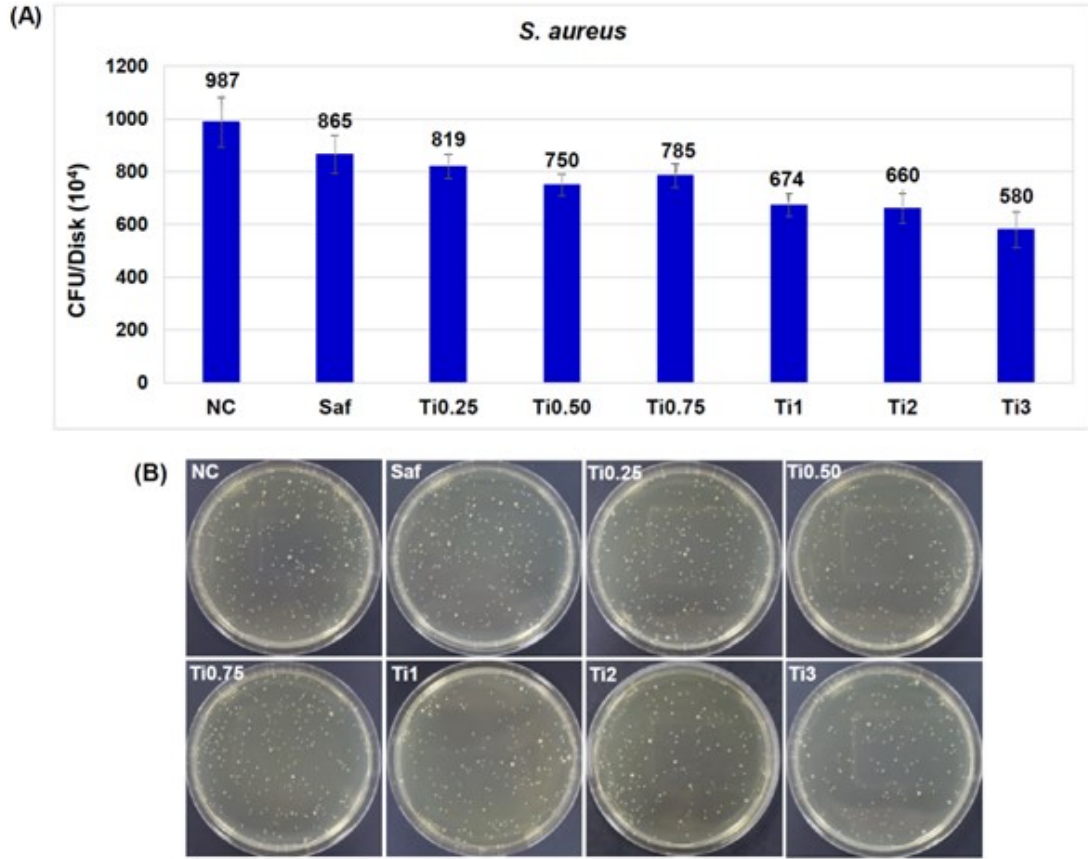
4.7. Antibakteriyel Test Bulguları

Üretilen TiO_2 katkılı numunelerin yanı sıra saf reçine ve polistiren negatif kontrol disklerine bakteriyel tutunma davranışları, *S. aureus* ve *P. aeruginosa* olmak üzere iki farklı test bakterisinin kullanıldığı ve 3 saatlik inkübasyon süresi sonunda gerçekleştirilen canlı sayım tekniği ile değerlendirilmiştir. Elde edilen canlı sayım sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Saf ve TiO_2 katkılı örneklere tutunan test bakterilerinin canlı sayım sonuçları.

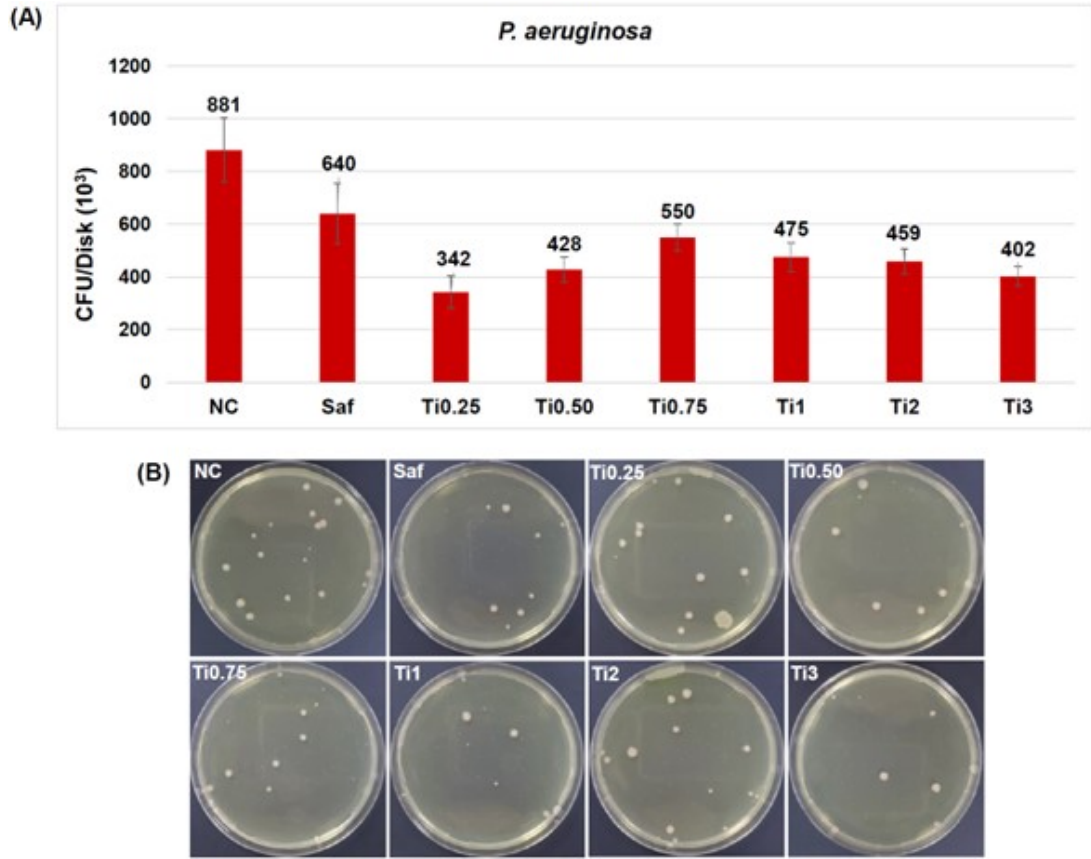
Numuneler	<i>Staphylococcus aureus</i> CFU/Disk (10^4)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> CFU/Disk (10^3)
Saf	865±72.51	640±113.58
Ti0.25	819±45.30	342±61.99
Ti0.50	750±40.58	428±46.6
Ti0.75	785±45.03	550±51.64
Ti1	674±43.51	475±55.51
Ti2	660±57	459±46.57
Ti3	580±67.64	402±36.37
NC (polistiren)	987±94.54	880±121.24

S. aureus test bakterisi için 3 saatlik inkübasyon sonrasında polistiren negatif kontrol ve saf reçine diskleri ile elde edilen canlı sayım sonuçları sırasıyla 987×10^4 ve 865×10^4 CFU/Disk olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, %0.25-%3 arası farklı oranlarda TiO₂ katkılı test numunelerine (Ti0.25; Ti0.50; Ti0.75; Ti1; Ti2; Ti3) tutunan bakteri sayısının ise 819×10^4 - 580×10^4 CFU/Disk aralığında olduğu belirlenmiştir. Negatif kontrol ve saf reçine ile kıyaslandığında, tüm katkılanmış numuneler için bakteriyel adezyonda azalma gözlenmiştir. Adezyondaki baskılanmanın artan TiO₂ konsantrasyonu ile arttığı ve en yüksek baskılama değerine (580×10^4 CFU/Disk) %3 TiO₂ katkı oranı ile ulaştığı tespit edilmiştir. Bu katkı oranında elde edilen baskılama yüzdesinin saf reçineye kıyasla yaklaşık %33, negatif kontrole kıyasla da %41.2 oranında olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Numunelerin yüzeyine tutunan *S. aureus* ATCC 25923 için canlı sayım sonuçları (A) ve bu sonuçlara ait petri görüntüleri (B). 3 bağımsız denemenin ortalaması ve standart sapmaları verilmiştir.

Bir diğer test bakterisi olan *P. aeruginosa* için yapılan adezyon çalışmalarında ise TiO₂ katkılı numunelerin yüzeyine tutunan canlı bakteri sayısının 342×10^3 - 550×10^3 CFU/Disk arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.11). Bu değerlerin, saf reçine (640×10^3 CFU/Disk) ve negatif kontrol (880×10^3 CFU/Disk) numuneleri için hesaplanan canlı sayım sonuçlarından daha düşük çıkması, katkılama ile birlikte bakteriyel adezyonda da bir düşüş olduğunu işaret etmiştir. TiO₂ ile katkılanmış numunelere tutunan en düşük canlı sayımı %0.25 katkılama oranı ile Ti0.25 kodlu disklerde tespit edilmiştir. Bu değer, bakteriyel adezyonun saf reçineye kıyasla %46.6 oranında, negatif kontrole kıyasla da %61.14 oranında gerçekleştiğini göstermiştir.



Şekil 4.11. Numunelerin yüzeyine tutunan *P. aeruginosa* ATCC 25923 için canlı sayım sonuçları (A) ve bu sonuçlara ait petri görüntüleri (B). 3 bağımsız denemenin ortalaması ve standart sapmaları verilmiştir.

5. TARTIŞMA

5.1. TiO₂ Katkısına Bağlı Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, TiO₂ nanopartikül katkısı DLP yöntemiyle üretilen kulak kalıbı numunelerinin yüzey pürüzlülüğünü belirgin biçimde etkilemiştir. Saf fotopolimer numunede $R_a = 2.131 \mu\text{m}$ olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü, TiO₂’nin düşük ve orta oranlarda ilavesiyle önemli ölçüde azalmış;

%0.25–%0.75 aralığında R_a değerleri $1.024 \mu\text{m}$ ’den $0.313 \mu\text{m}$ ’ye düşmüştür. Bu durum, TiO₂ nanopartiküllerinin uygun oranlarda fotopolimer matris içerisinde homojen dağılmasıyla yüzey morfolojisinin iyileştirilebildiğini göstermektedir.

Vat-fotopolimerizasyon temelli 3B baskı sistemlerinde, dolgu nanopartiküllerinin ışık–reçine etkileşimini değiştirerek kürlenme derinliği ve yüzey çözünürlüğü üzerinde belirleyici rol oynadığı bilinmektedir (Jacobs, 1992; Melchels vd., 2010). Düşük ve orta düzey TiO₂ katkılarında, nanopartiküllerin ışığın reçine içerisindeki kontrolsüz yayılımını sınırladığı, böylece kenar bulanıklığı ve aşırı kürlenme (overcure) kaynaklı yüzey kusurlarının azaldığı rapor edilmiştir (Quan vd., 2020; Bagheri & Jin, 2019). Bu literatür bulguları, çalışmada %0.25–%0.75 TiO₂ aralığında elde edilen yüzey pürüzlülüğündeki belirgin düşüş ile uyumludur. TiO₂ katkı oranının %1 ve %2’ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla

$0.404 \mu\text{m}$ ve $0.491 \mu\text{m}$ seviyelerine yükselmesi, artan nanopartikül içeriğine bağlı olarak fotopolimer matris içerisinde lokal aglomerasyon oluşumu ve ışık saçılımının artmasıyla açıklanabilir. Literatürde, yüksek dolgu oranlarının DLP ve SLA sistemlerinde kürlenme homojenliğini bozarak katman yüzeyinde düzensizliklere yol açabildiği bildirilmektedir (Hanon vd., 2021).

Genel olarak değerlendirildiğinde, TiO₂ nanopartikül katkısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin katkı oranına duyarlı olduğu ve özellikle düşük–orta katkı seviyelerinde yüzey kalitesinin belirgin biçimde iyileştirilebildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, TiO₂ katkılı fotopolimer sistemlerin kulak kalıbı gibi yüzey konforunun ve biyolojik temasın kritik olduğu medikal uygulamalarda, uygun katkı oranları seçildiğinde önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir.

5.2. FT-IR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.2’de katkısız (saf) ve TiO₂ katkılı numunelere ait FT-IR spektrumları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Spektrumlar incelendiğinde, TiO₂ ilavesiyle

birlikte özellikle düşük dalga sayısı bölgesinde belirgin spektral değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. 500–800 cm^{-1} aralığında TiO_2 katkılı numunelerde ortaya çıkan ve şiddeti artan absorpsiyon bantları, literatürde Ti–O–Ti ve Ti–O bağ titreşimleri ile ilişkilendirilmekte olup, titanyum oksit nanopartiküllerinin polimer matris içerisine başarılı bir şekilde dâhil edildiğini göstermektedir (Wu vd., 2014).

Bunun yanı sıra, 1428 cm^{-1} civarında gözlenen titreşim pikindeki görelî değişimler, TiO_2 nanopartikülleri ile fotopolimer matris arasındaki etkileşimlerin varlığına işaret etmektedir. Ana polimer yapıya ait karakteristik bantlar olan yaklaşık 1720 cm^{-1} (C=O), 1527 cm^{-1} (C=C) ve 1130 cm^{-1} (C–O–C / C–O) bölgelerindeki titreşimlerin tüm numunelerde korunması, fotopolimer matrisin kimyasal iskeletinin TiO_2 ilavesi sonrasında bozulmadığını göstermektedir (Mai vd., 2021; Mubarak vd., 2020).

Ayrıca, 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} civarında gözlenen bantlar, $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ gruplarına ait karakteristik gerilme titreşimleri ile uyumlu olup, polimer zincir yapısının korunmuş olduğunu doğrulamaktadır (Datta vd., 2016). Yüksek TiO_2 katkı oranlarında FT-IR bantlarının şiddet ve şekillerinde gözlenen görelî değişimler ise, nanopartiküller arasındaki etkileşimlerin artmasına ve olası aglomerasyon eğilimine işaret etmektedir.

5.3. TG/DTA Analizinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada gerçekleştirilen TG/DTA/DTG analizleri, TiO_2 nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin termal bozunma davranışı ve ısıl kararlılığı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Saf ve TiO_2 katkılı numunelere ait TG/DTA/DTG eğrileri Şekil 4.4’te, DTG maksimum bozunma sıcaklıkları ise Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, tüm numunelerin çok kademeli bir termal bozunma mekanizması sergilediğini göstermektedir. DTG eğrilerinde gözlenen üç belirgin bozunma basamağı ($T_{1\text{max}}$, $T_{2\text{max}}$ ve $T_{3\text{max}}$), fotopolimer esaslı sistemlerde literatürde rapor edilen termal davranış ile uyumludur. İlk bozunma basamağının ($T_{1\text{max}} \approx 274\text{--}281$ °C) düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin, zayıf bağlanmış yan grupların veya ağ yapısındaki daha düşük enerjili bağların ayrışmasına karşılık geldiği bildirilmektedir. İkinci bozunma basamağı ($T_{2\text{max}} \approx 352\text{--}366$ °C), çapraz bağlı fotopolimer ağ yapısının parçalanmasıyla ilişkilendirilirken, üçüncü ve ana bozunma basamağının ($T_{3\text{max}} \approx 427\text{--}433$ °C) ise polimer ana zincirinin termal olarak parçalanmasına karşılık geldiği kabul edilmektedir (Mubarak vd., 2020).

TiO₂ nanopartikül katkısının etkisi incelendiğinde, özellikle düşük ve orta katkı oranlarında (Ti_{0.25}–Ti₁) T_{2max} değerlerinin saf numuneye kıyasla daha yüksek sıcaklıklara kaydığı görülmektedir. Bu durum, TiO₂ nanopartiküllerinin fotopolimer matris içerisinde ısıya karşı bir bariyer etkisi oluşturduğunu ve bozunma sürecini geciktirdiğini düşündürmektedir. Literatürde TiO₂'nin yüksek termal kararlılığı ve inorganik yapısı sayesinde, polimer matrislerde ısı transferini sınırlandırarak termal stabiliteyi artırabildiği yaygın olarak rapor edilmiştir (Wu vd., 2014; Datta vd., 2016). Bununla birlikte, daha yüksek TiO₂ katkı oranlarında (özellikle Ti₂ numunesinde) T_{2max} değerinin yeniden daha düşük sıcaklıklara kayması, nanopartikül katkısının her oranda aynı düzeyde stabilizasyon sağlamadığını göstermektedir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında ortaya çıkabilen nanopartikül aglomerasyonu ve matris–dolgu ara yüzeyindeki heterojenlik ile ilişkilendirilmektedir. Literatürde, yüksek dolgu içeriğinin yerel ısı birikimine ve bozunma sürecinin erken başlamasına yol açabileceği bildirilmektedir (Datta vd., 2016; Bernasconi vd., 2024).

Ana bozunma basamağına karşılık gelen T_{3max} değerlerinin tüm numunelerde dar bir sıcaklık aralığında (427–433 °C) kalması, TiO₂ katkısının fotopolimer ana zincirinin termal parçalanma sıcaklığını köklü biçimde değiştirmedeğini göstermektedir. Bu bulgu, FTIR analizlerinde de doğrulandığı üzere, TiO₂ nanopartiküllerinin polimer matrisin kimyasal iskeletini bozmadığı ve yapıya esasen fiziksel bir dolgu fazı olarak dâhil olduğu sonucunu desteklemektedir.

DTA eğrilerinde gözlenen termal olaylar, DTG ile uyumlu şekilde ilerlemekte ve bozunma basamaklarının endotermik/ekzotermik karakterini doğrulamaktadır. Özellikle ikinci ve üçüncü bozunma bölgelerinde gözlenen belirgin DTA sinyalleri, polimer ağ yapısının parçalanma süreçlerinin ısı alışverişi ile birlikte gerçekleştiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TG/DTA analizleri TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin termal kararlılığını özellikle düşük ve orta katkı oranlarında artırabildiğini, ancak yüksek katkı oranlarında bu etkinin sınırlanabildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, TiO₂ katkılı fotopolimer sistemlerde optimum katkı oranının yalnızca mekanik değil, aynı zamanda termal performans açısından da kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

5.4. TiO₂ Katkısının Numunelerin Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin mekanik davranışı üzerindeki etkisi, çekme testleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Çekme testi sonuçları Çizelge 4.3'te özetlenmiş, numunelere ait gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.5'de, elastisite modülündeki değişimler ise Şekil 4.6'da sunulmuştur. Elde edilen bulgular, TiO₂ katkı oranına bağlı olarak çekme dayanımı, rijitlik ve süneklik arasında belirgin bir değişim eğilimi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3 incelendiğinde, saf fotopolimer numunenin kopma dayanımı 35.81 MPa olarak belirlenmiştir. TiO₂ nanopartikül ilavesiyle birlikte çekme dayanımında artış gözlenmiş; %0.25, %0.50 ve %0.75 TiO₂ katkılı numunelerde kopma dayanımı saf numuneye göre sırasıyla %6.6, %8.6 ve %9.2 oranında artmıştır. Bu sonuçlar, en yüksek dayanım artışının %0.75 TiO₂ katkı oranında elde edildiğini göstermektedir. %1 TiO₂ katkılı numunede dayanım artışı %8.8 ile benzer seviyede kalırken, daha yüksek katkı oranlarında (%2 ve %3) dayanım artışının sırasıyla %5.7 ve %3.8 seviyelerine gerilediği görülmektedir. Bu “optimum dolgu oranına kadar artış, daha sonra plato/azalma” eğilimi, vat-fotopolimerizasyon tabanlı nanokompozitlerde sık rapor edilen bir davranıştır (Mubarak vd., 2020; Gil vd., 2023).

Bu eğilim, Şekil 4.5'te sunulan gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinde de açıkça izlenmektedir. Düşük ve orta TiO₂ katkı oranlarında numunelerin daha yüksek maksimum gerilme değerlerine ulaştığı, ancak yüksek katkı oranlarında eğrilerin daha erken kopma gösterdiği görülmektedir. Literatürde, düşük–orta dolgu yüklemelerinde nanopartiküllerin polimer matris içerisinde daha homojen dağılmasıyla yük aktarımının iyileştiği; buna karşılık yüksek dolgu oranlarında aglomerasyon, ara-yüzey zayıflıkları ve kusur kaynaklı gerilme yığılması nedeniyle dayanım kazanımının sınırlanabildiği bildirilmektedir (Bernasconi vd., 2024; Bianchi vd., 2023).

Elastisite modülü değerleri incelendiğinde (Şekil 4.6), TiO₂ katkısının numunelerin rijitliğini belirgin biçimde artırdığı görülmektedir. Saf numuneye kıyasla elastisite modülü %0.25 TiO₂ katkılı numunede %6.3, %0.50 katkılı numunede %14.6, %0.75 katkılı numunede %16.7 ve %1 TiO₂ katkılı numunede

%17.7 oranında artış göstermiştir. Daha yüksek katkı oranlarında (%2 ve %3) elastisite modülündeki artışın %14.6–%16.7 aralığında seyrettiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, TiO₂ gibi inorganik nanopartiküllerin polimer zincir hareketliliğini

kısıtlayarak sistem rijitliğini artırdığına dair önceki çalışmalarla uyumludur (Wu vd., 2014).

Kopma uzaması değerleri değerlendirildiğinde (Çizelge 4.3), düşük TiO₂ katkı oranlarında sünekliğin korunduğu veya arttığı görülmektedir. %0.25 TiO₂ katkılı numunede kopma uzaması saf numuneye göre %8.5 oranında artarken, %0.75 katkılı numunede %2.7'lik bir artış gözlenmiştir. Buna karşın, %1 ve üzeri TiO₂ katkı oranlarında kopma uzamasında azalma meydana gelmiş; %1, %2 ve %3 katkılı numunelerde bu azalma sırasıyla %5.1, %4.6 ve %17.6 olarak belirlenmiştir. Bu durum, artan TiO₂ içeriği ile birlikte malzemenin daha rijit ve daha gevrek bir davranış sergilediğini göstermekte olup, vat-fotopolimerizasyonla üretilen nanokompozitlerde rijitlik-süneklik dengesi bağlamında rapor edilen bulgularla örtüşmektedir (Datta vd., 2016; Gil vd., 2023).

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 4.5–4.6 ve Çizelge 4.3 birlikte ele alındığında, TiO₂ nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin çekme dayanımı ve elastisite modülünü özellikle %0.50–%0.75 katkı aralığında belirgin biçimde iyileştirdiği; ancak daha yüksek katkı oranlarında süneklik kaybı ve dayanım artışının sınırlanması nedeniyle mekanik performans açısından optimal bir denge sağlanamadığı sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, TiO₂ katkılı fotopolimer sistemlerde optimum katkı oranının mekanik performans açısından kritik bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Mubarak vd., 2020; Bernasconi vd., 2024).

5.5. İyon Salımı ve Sitotoksite Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Alamar Blue analizi sonuçları, Ti katkılı tüm kulak kalıbı örneklerinde hem 24 saatlik hem de 14 günlük ekstraksiyon koşullarında hücre canlılığının %96-106 aralığında korunduğunu ortaya koymuştur. Bu değerler, ISO 10993-5 standardında sitotoksik olmayan materyaller için kabul edilen %70 canlılık sınırının belirgin biçimde üzerindedir. Buna karşılık, pozitif kontrol grubunda (ZnSO₄) hücre canlılığının %20-25 seviyelerine düşmesi, kullanılan deney sisteminin sitotoksik etkilere duyarlı olduğunu ve testin geçerliliğini doğrulamaktadır.

Titanyum ve titanyum bazlı materyallerin biyouyumluluğu, literatürde kapsamlı biçimde rapor edilmiştir. Özellikle Ti ve TiO₂ içeren sistemlerin, yüzeyde oluşan kararlı oksit tabakası ve düşük iyon salımı sayesinde fibroblast hücreleriyle

yüksek uyumluluk sergilediği bilinmektedir (Brånemark vd., 2001; Elias vd., 2008). Ayrıca, DLP ve SLA gibi fotopolimer esaslı katkılı üretim teknikleriyle elde edilen titanyum içeren polimer kompozitlerin NIH/3T3 ve L929 fibroblast hücreleri üzerinde sitotoksik etki göstermediği daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Lin vd., 2018; Zeng vd., 2025). Bu bağlamda, mevcut çalışmada elde edilen sitotoksikite sonuçlarının literatürle yüksek derecede uyumlu olduğu görülmektedir. TiO₂ katkılı bazı gruplarda hücre canlılığı değerlerinin %100'ün üzerine çıkması, Alamar Blue testinin hücre metabolik aktiviteye duyarlı doğasıyla açıklanabilir. Literatürde, biyouyumlu yüzeylerin hücre metabolizmasını uyararak göreceli olarak daha yüksek absorpsiyon veya floresans sinyallerine yol açabileceği belirtilmektedir (Rampersad, 2012). Bu nedenle, gözlenen canlılık artışlarının hücre metabolik aktivitenin korunması veya desteklenmesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

ICP-MS analizleri, TiO₂ katkılı kulak kalıbı numunelerinden yapay ter ortamına salınan titanyum iyonlarının son derece düşük seviyelerde kaldığını ortaya koymuştur. Kısa süreli ekstraksiyon (1 gün) sonrasında tüm TiO₂ katkılı gruplarda titanyum iyon konsantrasyonlarının cihaz tespit limitinin altında (<0.02 ppb) olması, erken dönem temas koşullarında anlamlı bir iyon salımının gerçekleşmediğini göstermektedir. Uzun süreli ekstraksiyon (14 gün) sonunda ise titanyum iyon salımının katkı oranına bağlı olarak bir artış sergilediği, en yüksek katkıda değer

0.15 ppb seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Literatürde, titanyum ve titanyum oksit esaslı materyallerin yapay ter ve benzeri fizyolojik ortamlarda çok düşük iyon salımı gösterdiği (Montalvo vd., 2023; Sinha vd., 2023) metallerde bunun temel nedeninin titanyum yüzeyinde oluşan kararlı ve koruyucu oksit tabakası olabileceği ifade edilmektedir (Hanawa, 2004; Okazaki vd., 2004). Ayrıca, ppb mertebesindeki Ti iyon konsantrasyonlarının hücre metabolizması veya inflamatuvar yanıt oluşturacak seviyelerin oldukça altında olduğu bildirilmiştir (Hanawa, 2004; Okazaki vd., 2004; Hallab vd., 2005).

Literatürde metal iyon salımı ile sitotoksikite arasında doğrudan bir ilişki bulunduğu, ancak bu ilişkinin ancak iyon konsantrasyonlarının belirli eşik değerleri aşması durumunda biyolojik açıdan anlam kazandığı belirtilmektedir (Hallab vd., 2005; International Organization for Standardization, 2019). Sitotoksikite ve iyon salımı bulguları birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada belirlenen titanyum iyon konsantrasyonlarının çok düşük olduğu (ppb düzeyinde) ve buna bağlı olarak hücre metabolizması düzeyinde herhangi bir sitotoksik etki gözlenmediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması titanyum katkılı kulak kalıbı materyallerinin in vitro koşullarda sitotoksik olmadığını, çok düşük iyon salımı sergilediğini ve biyouyumluluk açısından güvenli bir profil sunduğunu ortaya koymaktadır.

5.6. Bakteriyel Adezyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dış kulak yolu (kanalı) ve ortak kulak gibi enfeksiyon bölgelerinden alınan örneklerle gerçekleştirilen araştırmalar; hastalığa neden olan predominant türler arasında *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Proteus mirabilis* gibi bakteriyel türlerin yanı sıra *Candida* ve *Aspergillus* cinslerine üye fungusların da bulunduğunu ortaya koymuştur. (Roland ve Stroman, 2002; Kiakojuri vd., 2016; Burton vd., 2022; Luthra vd., 2022; Gunbey vd., 2023). Bu nedenle, mevcut çalışma kapsamında üretilen kulak kalıbı örneklerinin antimikrobiyal potansiyellerinin incelenmesi için test mikroorganizmaları olarak Gram-pozitif *S. aureus* ve Gram-negatif *P. aeruginosa* bakterileri seçilmiştir.

Literatürde, titanyum yüzeylerin patojen bakterilerin adezyonu engellediği/azalttığını raporlayan çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Harris vd., 2004; Patel vd., 2016; Malhotra vd., 2019; Šístková vd., 2024; Rao vd., 2024). Mevcut çalışmada, iki test bakterisi için de gerçekleştirilen kısa süreli inkübasyon (3 saat) sonrasında farklı oranlarda TiO₂ katkılı numune yüzeylerinde tutunan bakteri sayısında belirgin azalmalar gözlenmiştir. Bu nedenle, elde edilen bulgular literatür ile yüksek derecede uyumlu bulunmuştur. Bununla birlikte, negatif kontrol ile kıyaslandığında *S. aureus* için adezyondaki en yüksek baskılama oranı yaklaşık %41 ile %3 TiO₂ katkılı numunelerde (Ti3) tespit edilmesine karşın *P. aeruginosa*'nın adezyonundaki en yüksek baskılama oranı ise yaklaşık %61 ile %0.25 TiO₂ katkılı numunelerde (Ti0.25) hesaplanmıştır. Saf reçine ile karşılaştırıldığında ise bu baskılama oranının *S. aureus* ve *P. aeruginosa* için sırasıyla yaklaşık %33 ve %47 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Böylece, kulak kalıbı materyaline TiO₂ katkılanması ile hedeflenen antimikrobiyal etkinliğin kazandırılması sağlanmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Dijital Işık İşleme (DLP) tabanlı üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak titanyum dioksit (TiO_2) nanopartikül katkı, antibakteriyel özellikli ve kişiye özel kulak kalıplarının üretimi gerçekleştirilmiş; elde edilen yapıların yapısal, mekanik, termal ve biyolojik özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

DLP tabanlı 3B baskı yöntemi ile TiO_2 nanopartikül katkıli fotopolimer reçinelerin başarıyla basılabildiği ve kulak kalıbı geometrilerinin yüksek boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi ile üretilebildiği gösterilmiştir. Seçilen baskı parametrelerinin (katman kalınlığı, pozlama süresi) fotopolimer–nanopartikül sistemleri için uygun olduğu belirlenmiştir.

FTIR analizleri, TiO_2 katkısına rağmen fotopolimer matrisin kimyasal iskeletinin korunduğunu ve TiO_2 'nin yapı içerisine fiziksel bir dolgu fazı olarak dâhil olduğunu göstermiştir. Ti–O ve Ti–O–Ti titreşimlerine ait karakteristik bantların varlığı, nanopartiküllerin yapıya başarıyla entegre edildiğini doğrulamıştır.

TG/DTA analizleri, tüm numunelerin çok kademeli bir termal bozunma davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. TiO_2 nanopartikül katkısının özellikle düşük ve orta oranlarda ara bozunma basamaklarını daha yüksek sıcaklıklara kaydırarak termal kararlılığı artırabildiği; ancak yüksek katkı oranlarında bu etkinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü analizleri, TiO_2 katkısının belirli oranlara kadar yüzey pürüzlülüğünü anlamlı biçimde azalttığını göstermiştir. Özellikle %0.75–%1 TiO_2 katkıli numunelerde elde edilen düşük pürüzlülük değerleri, bakteriyel adezyonun azaltılması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Mekanik test sonuçları, TiO_2 nanopartikül katkısının kulak kalıbı numunelerinin çekme dayanımı ve elastisite modülünü olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Saf numuneye kıyasla en yüksek çekme dayanımı artışı %0.75 TiO_2 katkıli numunede elde edilmiş; daha yüksek katkı oranlarında ise süneklik kaybı ve mekanik performans artışının sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, mekanik performans açısından optimum TiO_2 katkı oranının kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Antibakteriyel ve antibiyofilm testleri, TiO₂ katkılı kulak kalıplarının saf polimer numunelere kıyasla belirgin antibakteriyel aktivite sergilediğini göstermiştir. TiO₂ nanopartiküllerinin fotokatalitik etkisi sayesinde bakteri üremesinin ve biyofilm oluşumunun baskılandığı belirlenmiştir.

Sitotoksisite testleri, uygun TiO₂ katkı oranlarında üretilen kulak kalıplarının 3T3 fibroblast hücreleri üzerinde toksik etki göstermediğini ve biyouyumlu bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, TiO₂ katkısının kontrollü oranlarda kullanılması durumunda biyolojik güvenliğin korunabildiğini göstermektedir.

Genel olarak bu çalışma, DLP tabanlı 3B baskı teknolojisinin TiO₂ nanopartikül katkılı, antibakteriyel ve kişiye özel kulak kalıplarının üretimi için uygun ve etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, hem mekanik ve termal performans hem de biyolojik etkinlik açısından optimum TiO₂ katkı oranının belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

7. ÖNERİLER

Gelecek çalışmalarda, TiO₂ nanopartiküllerinin yüzey modifikasyonu (örneğin silanizasyon) gerçekleştirilerek polimer matris içerisindeki dağılımının iyileştirilmesi ve aglomerasyon eğiliminin azaltılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek katkı oranlarında mekanik ve termal performansın artırılmasına katkı sağlayabilir.

· TiO₂ nanopartiküllerinin farklı kristal fazlarının (anatase, rutile veya karışık faz) kulak kalıplarının antibakteriyel, mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, daha etkili formülasyonların geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

· Antibakteriyel etkinliğin mekanizmasını daha ayrıntılı ortaya koymak amacıyla, fotokatalitik aktivite testleri, reaktif oksijen türleri (ROS) oluşum analizleri ve uzun süreli antibiyofilm çalışmaları yapılması önerilmektedir.

· Uzun dönem kullanım koşullarını simüle etmek amacıyla, TiO₂ katkılı kulak kalıplarının yaşlandırma, terleme ve mekanik yorulma testlerine tabi tutulması, klinik kullanım süresi açısından önemli veriler sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Aktas, B., Das, R., Acikgoz, A., Ulas, E. O., Demircan, G., Uyar, E., ... & Kisa, M. (2025). Fabrication of CaSiO₃-Doped 3Y-ZrO₂ Ceramics via DLP 3D Printing: Structural, Mechanical, and Biological Evaluation. *Journal of Alloys and Compounds*, 181895.
- Aktas, B., Das, R., Aktas, H. G., Uyar, E., Yalcin, S., Ergin, B., ... & Ulas, E. O. (2025). Additive manufacturing of TiO₂-doped 3Y-ZrO₂ ceramics via DLP-3D printing for dental implant applications: Enhanced mechanical strength, biocompatibility, and antibacterial performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 182246.
- Šístková, J., Fialová, T., Svoboda, E., Varmužová, K., Uher, M., Číhalová, K., ... & Pávková Goldbergová, M. (2024). Insight into antibacterial effect of titanium nanotubular surfaces with focus on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Scientific Reports*, 14(1), 17303.
- Aktas, H. G., Das, R., Aktas, B., Uyar, E., Yalcin, S., Celik, Z., Ergin, B., & Oruc Ulas, E. (2025). Impact of calcium silicate and titanium dioxide co-doping on the microstructure and bioactivity of 3D-Printed 3Y-ZrO₂ ceramics. *Ceramics International*, 51(29), 60666-60682.
- Alharbi, N. D., Moselhy, M. T., & Guirguis, O. W. (2025). Impact of doping different concentrations of TiO₂ nanoparticles to PMMA on its structural, thermal and optical properties for optical applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 661, 123558.
- Bagheri, A., & Jin, J. (2019). Photopolymerization in 3D printing. *ACS Applied Polymer Materials*, 1(4), 593–611.
- Bernasconi, R., Belle, U., Brigatti, S., & Diamanti, M. V. (2024). 3D printing of photocatalytic nanocomposites containing titania nanoparticles. *Additive Manufacturing*, 79, 103916.
- Bianchi, I., Forcellese, A., Mancina, T., & Simoncini, M. (2023). Tensile properties and sustainability assessment of vat photopolymerization 3D printed components with recovered plastic filler. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(5), 2171-2182.
- Brånemark, R., Brånemark, P. I., Rydevik, B., & Myers, R. R. (2001). Osseointegration in skeletal reconstruction and rehabilitation: a review. *Journal of rehabilitation research and development*, 38(2), 175-182.
- Brook, I. (2012). Microbiology and management of otitis externa. *The Journal of Laryngology & Otology*, 126(3), 239–243.
- Burton, M., Krumbeck, J. A., Wu, G., Tang, S., Prem, A., Gupta, A. K., & Dawson Jr, T. L. (2022). The adult microbiome of healthy and otitis patients: Definition of the core healthy and diseased ear microbiomes. *PLoS One*, 17(1), e0262806.
- Busscher, H. J., Rinastiti, M., Siswomihardjo, W., & Van der Mei, H. C. (2010).

- Biofilm formation on dental restorative and implant materials. *Journal of dental research*, 89(7), 657-665.
- Datta, J., Kosiorek, P., & Włoch, M. (2016). Effect of high loading of titanium dioxide particles on the morphology, mechanical and thermo-mechanical properties of the natural rubber-based composites. *Iranian Polymer Journal*, 25(12), 1021-1035.
- Denk, F., Wimmer, W., & Kompis, M. (2023). Occlusion and coupling effects with different earmold designs. *International Journal of Audiology*.
- Dillon, H. (2012). *Hearing aids* (2nd ed.). Thieme Medical Publishers.
- Elias, C.N., Lima, J.H.C., Valiev, R. et al. Biomedical applications of titanium and its alloys. *JOM* 60, 46–49 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11837-008-0031-1>
- Erdoğan, A. A., & Arslan, Ş. N. (2016). The Effects of Silicone and Acrylic Ear Mold Materials on Outer Ear Canal Resonance Characteristics. *Journal of International Advanced Otolaryngology*, 12(2).
- Foster, H. A., Ditta, I. B., Varghese, S., & Steele, A. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(6), 1847–1868.
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface science reports*, 63(12), 515-582.
- Gebler, M., Uiterkamp, A. J. S., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy policy*, 74, 158-167.
- Gil, L. D., de Camargo, I. L., Gutiérrez-Velásquez, E. I., & Colorado, H. A. (2023). Systematic overview of nanocomposites obtained by VAT photopolymerization techniques: A cost and life cycle assessment approach. *Revista UIS ingenierías*, 22(2), 1-14.
- González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., & Rodríguez-Hernández, J. (2019). Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 94, 57-116.
- Gumushan Aktas, H., Celik, Z., Ergin, B., Gencdal, S., Aslan, M., Aktas, B., & Yalcin, S. (2025). Bio-based gelatin composites reinforced with aloe vera, eggshell protein, and loofah for enhanced wound healing. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 1-26.
- Gunbey, F., Alici, A., & Ozturk-Yilmaz, G. (2023). Evaluation of Ear Swab Culture and Antibacterial Susceptibility Results of Patients Presenting with Probable Ear Infection/Kulak Infeksiyonu Suphesi ile Basvuran Hastaların Kultur Sonuclarinin ve Antibakteriyel Duyarlıliginin Degerlendirilmesi. *KLIMIK Journal*, 36(4), 256-262.
- Hallab, N. J., & Jacobs, J. J. (2009). Biologic effects of implant debris. *Bulletin of*

the NYU hospital for joint diseases, 67(2).

- Hallab, N. J., Anderson, S., Stafford, T., Glant, T., & Jacobs, J. J. (2005). Lymphocyte responses in patients with total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*, 23(2), 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.orthres.2004.09.001>
- Hanawa, T. (2004). Metal ion release from metal implants. *Materials Science and Engineering: C*, 24(6-8), 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2004.08.018>
- Hanon, M. M., Ghaly, A., Zsidai, L., Szakál, Z., Szabó, I., & Kátai, L. (2021). Investigations of the mechanical properties of DLP 3D printed graphene/resin composites. *Acta Polytech. Hung*, 18(8), 143-161.
- Harris, L. G., Tosatti, S., Wieland, M., Textor, M., & Richards, R. G. (2004). Staphylococcus aureus adhesion to titanium oxide surfaces coated with non-functionalized and peptide-functionalized poly (L-lysine)-grafted-poly (ethylene glycol) copolymers. *Biomaterials*, 25(18), 4135-4148.
- Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, 44(12R), 8269.
- <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-hearing>
- Humes, L. E. (2013). Understanding the speech-understanding problems of older adults. *American Journal of Audiology*, 22(2), 303–305.
- Iavicoli, I., Leso, V., & Bergamaschi, A. (2012). Toxicological effects of titanium dioxide nanoparticles: a review of in vivo studies. *Journal of Nanomaterials*, 2012(1), 964381.
- International Organization for Standardization. (2021). ISO Standard No. 10993-12: 2021. Biological evaluation of medical devices - Part 12: Sample preparation and reference materials.
- International Organization for Standardization. (2019). ISO Standard No. 10993-17:2019. Biological evaluation of medical devices-Part 17: Establishment of allowable limits for leachable substances.
- International Organization for Standardization. (2009). ISO Standard No. 10993-5: 2009. Biological evaluation of medical devices-Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity. International Organization for Standardization, Geneva, 34.
- ISO 10993-1. (2018). Biological evaluation of medical devices—Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. International Organization for Standardization.
- Jacobs, P. F. (1992). *Rapid prototyping & manufacturing: Fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- Jafari, S., Mahyad, B., Hashemzadeh, H., Janfaza, S., Gholikhani, T., & Tayebi, L. (2020). Biomedical applications of TiO₂ nanostructures: recent advances. *International journal of nanomedicine*, 3447-3470.

- Jimmy, C. Y., Tang, H. Y., Yu, J., Chan, H. C., Zhang, L., Xie, Y., ... & Wong, S. P. (2002). Bactericidal and photocatalytic activities of TiO₂ thin films prepared by sol-gel and reverse micelle methods. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 153(1-3), 211-219.
- Karaca, Ç. T., Akçay, S. Ş., Toros, S. Z., Oysu, Ç., Verim, A., Çelebi, Ş., & Aksaray, S. (2013). External auditory canal microbiology and hearing aid use. *American Journal of Otolaryngology – Head and Neck Medicine and Surgery*, 34(4), 278–282.
- Kiakojuri, K., Omran, S. M., Jalili, B., Hajiahmadi, M., Bagheri, M., Shahandashti, E. F., & Rajabnia, R. Bacterial otitis externa in patients attending an ENT clinic in Babol, North of Iran 2016. *Jundishapur Journal of Microbiology*.
- Kramer, S., & Brown, D. K. (2021). *Audiology: science to practice*. Plural Publishing.
- Kuk, F., Keenan, D., & Lau, C. C. (2009). Comparison of vent effects between a solid earmold and a hollow earmold. *Journal of the American Academy of Audiology*, 20(8), 480–491.
- Lin, X., Xiao, X., Wang, Y., Gu, C., Wang, C., Chen, J., Liu, H., Luo, J., Li, T., Wang, D., & Fan, S. (2018). Biocompatibility of Bespoke 3D-Printed Titanium Alloy Plates for Treating Acetabular Fractures. *BioMed Research International*, 2053486, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/2053486>
- Luthra, H., Sharma, V., & Jindal, N. (2022). Microbiological profile and antibiotic sensitivity of 100 cases of otitis externa. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, 74(Suppl 3), 3616-3619.
- Mai, Z., Liu, D., Chen, Z., Lin, D., Zheng, W., Dong, X., ... & Zhou, W. (2021). Fabrication and application of photocatalytic composites and water treatment facility based on 3d printing technology. *Polymers*, 13(13), 2196.
- Malhotra, R., Dhawan, B., Garg, B., Shankar, V., & Nag, T. C. (2019). A comparison of bacterial adhesion and biofilm formation on commonly used orthopaedic metal implant materials: an in vitro study. *Indian journal of orthopaedics*, 53(1), 148-153.
- Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
- Melik, H., Yalcin, S., Aktas, B., Aktas, H. G., Uyar, E., Celik, Z., Ergin, B., Demircan, G., & Balak, M. V. Three-Dimensionally Printed HEMA–TRIS Hydrogel Contact Lenses With Optimized Optical, Mechanical, and Antibacterial Performance. *Journal of Applied Polymer Science*, e70277. <https://doi.org/10.1002/app.70277>
- Montalvo, D., Mercier, G. M., Mast, J., & Cheyns, K. (2023). Release of silver and titanium from face masks traded for the general population. *Science of The Total Environment*, 901, 165616.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165616>

- Mubarak, S., Dhamodharan, D., Divakaran, N., Kale, M. B., Senthil, T., Wu, L., & Wang, J. (2020). Enhanced mechanical and thermal properties of stereolithography 3D printed structures by the effects of incorporated controllably annealed anatase TiO₂ nanoparticles. *Nanomaterials*, 10(1), 79.
- Murr, L. E. (2015). Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 5, 40–53.
- Nagaraj, K., Radha, S., Deepa, C. G., Raja, K., Umopathy, V., Badgujar, N. P., ... & Uthra, C. (2025). Photocatalytic advancements and applications of titanium dioxide (TiO₂): Progress in biomedical, environmental, and energy sustainability. *Next Research*, 2(1), 100180.
- N. Turner, B., Strong, R., & A. Gold, S. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, 20(3), 192-204.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Okazaki, Y., Gotoh, E., Manabe, T., & Kobayashi, K. (2004). Comparison of metal concentrations in rat tibia tissues with various metallic implants. *Biomaterials*, 25(28), 5913-5920. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.01.064>
- Orji, F. T., Onyero, E. O., & Agbo, C. E. (2014). The clinical implications of ear canal debris in hearing aid users. *Pakistan journal of medical sciences*, 30(3), 483.
- Patel, S. S., Aruni, W., Inceoglu, S., Akpolat, Y. T., Botimer, G. D., Cheng, W. K., & Danisa, O. A. (2016). A comparison of *Staphylococcus aureus* biofilm formation on cobalt-chrome and titanium-alloy spinal implants. *Journal of Clinical Neuroscience*, 31, 219-223.
- Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X. (2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*, 5(1), 110–115.
- Rampersad, S. N. (2012). Multiple Applications of Alamar Blue as an Indicator of Metabolic Function and Cellular Health in Cell Viability Bioassays. *Sensors*, 12(9), 12347-12360. <https://doi.org/10.3390/s120912347>
- Rao, Q., Weng, L., Zhang, J., Chen, Y., Yang, Y., Liu, D., ... & Zheng, S. (2024). A titanium-based superhydrophobic coating with enhanced antibacterial, anticoagulant, and anticorrosive properties for dental applications. *Coatings*, 14(5), 571.
- Roland, P. S., & Stroman, D. W. (2002). Microbiology of acute otitis externa. *The Laryngoscope*, 112(7), 1166-1177.
- Salih, R. M., Kadauw, A., Zeidler, H., & Aliyev, R. (2023). Investigation of LCD 3D printing of carbon fiber composites by utilising central composite

- design. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(2), 58.
- Shi, H., Magaye, R., Castranova, V., & Zhao, J. (2013). Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data. *Particle and fibre toxicology*, 10(1), 15.
- Sinha, A., Gupta, S., Taruna, T., Priya, L., Jha, A. K., Golwara, A., & Gore, N. R. (2023). Quantifying the Release of Titanium From the Titanium Dioxide-Impregnated Composites Used in Orthodontic Bonding. *Cureus*, 15(7), e42309. <https://doi.org/10.7759/cureus.42309>
- U.S. International Trade Commission. (2021). Listen: How 3D printing may increase trade in hearing aids (Executive briefing paper). U.S. International Trade Commission.
- Ventola, C. L. (2014). Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704.
- Vivero-Lopez, M., Xu, X., Muras, A., Otero, A., Concheiro, A., Gaisford, S., Basit, A. W., Alvarez-Lorenzo, C., & Goyanes, A. (2021). Anti-biofilm multi drug-loaded 3D printed hearing aids. *Materials Science and Engineering: C*, 119, 111606.
- Vouvoudi, E. C., Morfis, P. D., Verros, G. D., & Achilias, D. S. (2022). Polymerisation Kinetics on FT-IR and Colorimetric Changes under UV Irradiation for a Commercial Polycyanoacrylate Adhesive, Addressed to Glass Restoration. *Coatings*, 12(4), 490.
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., ... & Xie, Y. M. (2016). Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, 83, 127-141.
- Williams, D. F. (2008). On the mechanisms of biocompatibility. *Biomaterials*, 29(20), 2941–2953.
- World Health Organization. (2021). World report on hearing. World Health Organization.
- Wu, M., Zhang, F., Yu, J., Zhou, H., Zhang, D., Hu, C., & Huang, J. (2014). Fabrication and evaluation of light-curing nanocomposite resins filled with surface-modified TiO₂ nanoparticles for dental application. *Iranian Polymer Journal*, 23(7), 513-524.
- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4(5), 729–742.
- Zeng, L., Armstrong, S., Zhu, Y., Gregory, S. D., Huang, A., & Dyson, J. M. (2025). 3D-printed surfaces of titanium implant: The fibroblasts response. *Biomaterials Advances*, 166, 214006. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2024.214006>
- Zhu, W., Ma, X., Gou, M., Mei, D., Zhang, K., & Chen, S. (2016). 3D printing of functional biomaterials for tissue engineering. *Current opinion in*

biotechnology, 40, 103-112.

Zore, A., Zore, M., & Kutnjak, Z. (2022). Antibacterial effect of polymethyl methacrylate resin base containing TiO₂ nanoparticles. *Coatings*, 12(11), 1757.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

İsim Soyisim : MUHAMMED FURKAN KARACA
Doğum Tarihi : 1998-09-16
Doğum Yeri : ŞANLIURFA
Telefon : 5439765258
E-Posta : muhammedfurkankaraca2025@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Okul	Bölüm	Baş. Yılı	Bit. Yılı
Harran Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2016	2022