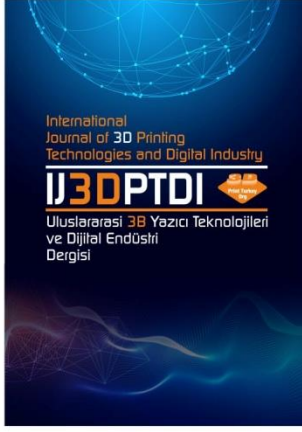




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 [Online]

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

ÜRETİM SÜRESİ FARKLILIKLARININ 3B YAZICIYLA HAZIRLANAN GEÇİCİ RESTORASYONLARIN RENK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF PRINTING DURATION VARIATIONS
ON THE COLOR AND SURFACE PROPERTIES OF 3D-
PRINTED TEMPORARY RESTORATIONS

Yazarlar (Authors): Hakkı Cenker Küçükeşmen , Ayça Topaloğlu *, Işık Kürkçüoğlu 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Küçükeşmen H. C., Topaloğlu A., Kürkçüoğlu I., “Üretim Süresi Farklılıklarının 3B Yazıcıyla Hazırlanan Geçici Restorasyonların Renk ve Yüzey Özelliklerine Etkisi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(3): 698-706, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1784488

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

ÜRETİM SÜRESİ FARKLILIKLARININ 3B YAZICIYLA HAZIRLANAN GEÇİCİ RESTORASYONLARIN RENK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

H. Cenker Küçükşenmen^a, Ayça Topaloğlu^{a*}, Işın Kürkcüoğlu^a

^a Süleyman Demirel Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Türkiye

* Sorumlu Yazar: aycatopaloglu@gmail.com

(Geliş/Received: 15.09.25; Düzeltme/Revised: 18.10.25; Kabul/Accepted: 21.12.25)

ÖZ

Bu çalışma, 3B baskı yöntemiyle üretilen geçici restorasyonlarda üretim süresinin renk, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve temas açısı gibi fiziksel ve yüzeysel özellikler üzerindeki etkisini incelemektedir. A1 tonunda metakrilat bazlı rezinden, 20, 40 ve 60 dakikalık üç farklı üretim süresinde toplam 30 adet $10 \times 10 \times 2$ mm boyutlarında numune hazırlanmış ve tümüne standart post-kür işlemi uygulanmıştır. Renk ölçümleri spektrofotometreyle, pürüzlülük profilometreyle, mikrosertlik Vickers cihazıyla, temas açısı ise “sessile drop” yöntemiyle belirlenmiştir. Veriler tek ve çift yönlü ANOVA ile analiz edilmiştir ($p < 0,05$). Gruplar arasında pürüzlülük farkı anlamlı bulunmazken, süre arttıkça azalma eğilimi gözlenmiştir. Sertlik ve temas açısı üretim süresiyle birlikte anlamlı biçimde artmıştır ($p < 0,05$). Renk parametrelerinde L^* , b^* , C ve h değerleri anlamlı farklılık göstermiş, a^* değeri sabit kalmıştır. Sonuç olarak, üretim süresi özellikle sertlik ve yüzey ıslanabilirliği üzerinde belirleyici olup, sürenin optimize edilmesi restorasyonların estetik ve mekanik performansını artırabilir.

Anahtar Kelimeler: 3B Baskı, Geçici Restorasyon, Üretim Süresi, Yüzey Özellikleri, Renk Parametreleri, Temas Açısı

THE EFFECT OF PRINTING DURATION VARIATIONS ON THE COLOR AND SURFACE PROPERTIES OF 3D-PRINTED TEMPORARY RESTORATIONS

ABSTRACT

This study investigates the effects of different production durations in 3D-printed temporary restorations on physical and surface properties such as color parameters, surface roughness, hardness, and contact angle. A total of 30 specimens ($10 \times 10 \times 2$ mm) were fabricated using a methacrylate-based temporary restoration resin in A1 shade, with three production times (20, 40, and 60 minutes). All samples underwent a standard post-curing process. Color measurements were performed using a spectrophotometer, surface roughness was measured with a contact profilometer, micro-hardness with a Vickers hardness tester, and contact angle by the sessile drop method. Data were analyzed using one-way and two-way ANOVA ($p < 0.05$). No statistically significant differences were found in surface roughness among groups, although a decreasing trend was observed with longer production times. Hardness and contact angle values increased significantly with extended production time ($p < 0.05$). Among color parameters, L^* , b^* , C , and h values showed significant variations, whereas the a^* value remained unchanged. In conclusion, production time has a significant influence on surface and physical properties, particularly hardness and wettability, and optimizing it may enhance the durability and aesthetic performance of temporary restorations in clinical applications.

Keywords: 3D Printing, Temporary Restoration, Printing Duration, Surface Properties, Color Parameters, Contact Angle.

1. GİRİŞ

Dijital teknolojiler, son yıllarda diş hekimliği uygulamalarında köklü bir dönüşüm başlatmış; bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) sistemleri aracılığıyla klinik süreçler daha hızlı, hassas ve öngörülebilir hale gelmiştir [1]. Bu dijital dönüşümün bir uzantısı olarak gelişen üç boyutlu (3B) baskı teknolojisi, düşük maliyet, kısa üretim süresi, kişiye özel tasarım imkânı ve yüksek üretim doğruluğu gibi avantajlarıyla, geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli ve pratik bir alternatif sunmaktadır [2–5].

Eklemeli üretim (additive manufacturing) yöntemleri, karmaşık anatomik yapıların minimum malzeme kullanımıyla ve insan müdahalesine gerek kalmadan üretilmesini mümkün kılarak klinik verimliliği artırmış ve hastalara aynı gün içinde tedavi olanağı sağlamıştır. Ayrıca 3B yazıcılarla hazırlanan geçici restorasyonların, geleneksel yöntemlerle üretilenlere göre sarf malzemesi ve ekipman maliyetleri açısından daha ekonomik olduğu bildirilmiştir [6–8]. Bu nedenlerle dijital üretim yöntemlerine, özellikle de 3B baskılı geçici restorasyonlara olan ilgi giderek artmaktadır.

Diş hekimliğinde kullanılan 3B baskı sistemlerinde genellikle metakrilik asit ester bazlı fotopolimer rezinler tercih edilmektedir. Bu materyaller, geçici restorasyonların yanı sıra bazı kalıcı restorasyonlarda da kullanılabilecek düzeyde estetik, mekanik ve biyouyumluluk özellikleri sergilemektedir [9]. Kron, köprü, inlay, onlay ve veneer gibi restoratif yapıların yanı sıra; ortodontik apareyler, cerrahi rehberler ve eğitim modelleri de bu teknolojilerle yüksek doğrulukta üretilmektedir [10]. Bununla birlikte, üretim sürecinde kullanılan baskı süresi, katman kalınlığı ve ışık şiddeti gibi parametrelerin bu materyallerin yüzey kalitesi, mekanik dayanımı ve renk parametreleri üzerindeki etkileri henüz yeterince aydınlatılamamıştır.

Baskı parametreleri, 3B baskılı restorasyonların nihai fiziksel ve yüzeysel özellikleri üzerinde belirleyici rol oynayan kritik değişkenlerdir. Özellikle baskı süresi; katmanlar arası bağlanma kalitesi, polimerizasyon derecesi ve üretim hassasiyeti üzerinde doğrudan etkilidir [11,12]. Bu nedenle baskı süresinin optimize edilmesi, hem estetik hem de mekanik açıdan

ideal restorasyon özelliklerinin elde edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Renk, dental materyallerin estetik başarısını belirleyen temel kriterlerden biridir ve Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE – Commission Internationale de l’Éclairage) tarafından geliştirilen CIE Lab* renk uzayı ile sayısal olarak ifade edilir. Bu sistemde L* değeri parlaklığı (açıklığı), a* değeri kırmızı-yeşil eksenini, b* değeri ise sarı-mavi eksenini temsil eder. Ayrıca kromatiklik (C) değeri rengin doygunluğunu, ton açısı (h) ise ton yönelimini belirtmektedir. Bu çalışmada, zaman bağlı renk değişimi yerine, üretim süresine göre bu parametrik renk değerlerindeki farklılıklar değerlendirilmiştir.

Literatürde çoğunlukla baskı sonrası kürleme (post-curing) sürelerinin yüzey sertliği, renk parametreleri ve mekanik dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır [13–16]; ancak baskı süresinin tek başına bu özellikler üzerindeki rolü sınırlı olarak incelenmiştir. Oysa baskı süresi, üretim sırasındaki ışık maruziyet süresini belirlediğinden, her bir katmanın polimerizasyon kalitesini ve dolayısıyla malzemenin nihai özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmanın hipotezi, üretim süresi arttıkça fotopolimerizasyon derecesinin yükselmesi sonucu numunelerin yüzey sertliği ve temas açısında artış, renk parametrelerinde ise anlamlı değişiklikler oluşacağı yönündedir. Post-kürleme protokolü sabit tutularak farklı baskı süreleriyle üretilen geçici restorasyon materyallerinin renk değerleri, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve temas açısı özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi kullanılarak geçici restorasyon materyallerinden örnekler hazırlanmıştır. Üretim süresi parametresinin etkisini değerlendirmek amacıyla yalnızca üretim süresi değiştirilmiş, diğer tüm üretim koşulları sabit tutulmuştur. Üretim süresini belirleyen temel parametre, katman başına düşen ışık maruziyet süresidir; bu süreçte Z eksen hızı sabit bırakılmıştır.

Bu çalışmada “üretim süresi” terimi, tüm modelin yazdırılma süresini ifade etmektedir. Üretim süresi, sabit katman kalınlığı ve sabit ışık şiddeti korunarak, katman başına uygulanan ışık maruziyet süresinin değiştirilmesiyle farklılaştırılmıştır. Bu kapsamda üretim süresi, modelin yazdırılması için geçen toplam süre olarak tanımlanmış; katman başına ışık maruziyet süresi değiştirilerek bu toplam süre kontrol edilmiştir. Geçici restorasyon materyali olarak, Şekil 1’de gösterilen A1 rengine metakrilat bazlı fotopolimer rezin (ArmaResin 3B Printing Polymer Resin, Arma Dental, Türkiye) kullanılmıştır. Toplam üç deney grubu oluşturulmuş; üretim süreleri sırasıyla 20 dakika, 40 dakika ve 60 dakika olarak belirlenmiştir. Her bir grup için $n = 10$ olacak şekilde, toplam 30 adet $10 \times 10 \times 2$ mm boyutlarında numune hazırlanmıştır.

Numuneler, Phrozen Sonic Mini 8K model 3B yazıcı kullanılarak, üretici firmanın önerdiği sabit baskı parametreleri (katman kalınlığı, ışık şiddeti vb.) korunarak üretilmiştir (Şekil 2). Kullanılan baskı parametreleri sırasıyla şu şekildedir: katman kalınlığı: 0,026 mm; taban katman sayısı: 6; taban ışıklandırma süresi: 25 s; taban kalkma yüksekliği: 6 mm; kaldırma yüksekliği: 6 mm; alt geri çekme mesafesi: 6 mm; mesafeyi geri çekme: 6 mm; taban yükselme hızı: 50 mm/dk; yükselme hızı: 150 mm/dk; geri çekilme hızı: 150 mm/dk. Z eksen hareket hızı sabit tutulmuş ve 150 mm/dk olarak belirlenmiştir. Üretim süreci boyunca ortam sıcaklığı 22 ± 2 °C’de sabit tutulmuştur. Tüm numuneler, üretim süresine göre 20, 40 ve 60 dakikalık baskı süreleri esas alınarak üç grupta sınıflandırılmış ve oda sıcaklığında (22 ± 2 °C) üretilmiştir. Toplam üretim süreleri, katman başına düşen ışık maruziyet süresinin ayarlanmasıyla kontrol edilmiştir. Buna göre 20, 40 ve 60 dakikalık gruplarda normal katman ışıklandırma süreleri sırasıyla 5 s, 7 s ve 8,5 s olarak belirlenmiştir (Z eksen hızı tüm gruplarda 150 mm/dk sabit tutulmuştur).

Baskı işlemi tamamlandıktan sonra örnekler, üretici firmanın önerileri doğrultusunda %96’lık izopropil alkol (IPA) solüsyonunda, Elegoo Mercury Plus (Elegoo, Çin) cihazının yıkama ünitesi (Şekil 3) kullanılarak 3 dakika süreyle temizlenmiştir. Temizleme işlemi sonrasında örnekler hava ile kurutulmuştur. Post-curing işlemi, aynı cihazın kütleme ünitesi

kullanılarak, 405 nm dalga boyunda ve yaklaşık $13 - 15$ mW/cm² ışık yoğunluğunda, toplam 60 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan polimer rezin



Şekil 2. Phrozen Sonic Mini 8K



Şekil 3. Elegoo Mercury Plus V2.0

Örnek yüzeylerinin standardizasyonu amacıyla sırasıyla 600–, 800–, 1000– ve 1200–grit zımparalar kullanılmış; her bir zımpara yaklaşık 30 saniye süreyle ve sabit manuel basınç altında (yaklaşık 2 – 3 N) parmak basıncıyla uygulanmıştır. Bu işlem, tüm örneklerin yüzey pürüzlülüğünü eşitlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Ardından, örneklerin polisajı için iki aşamalı Diacomp Plus Twist (EVE Ernst Vetter GmbH, Pforzheim, Almanya) polisaj seti kullanılmıştır.

Üretici firmanın önerilerine uygun olarak, ilk olarak pembe renkli ön parlatma lastiği 10.000 rpm hızda, ardından gri renkli yüksek parlaklık sağlayan lastik yine 10.000 rpm hızda her bir örneğe 60 saniye boyunca mikromotor yardımıyla uygulanmıştır.

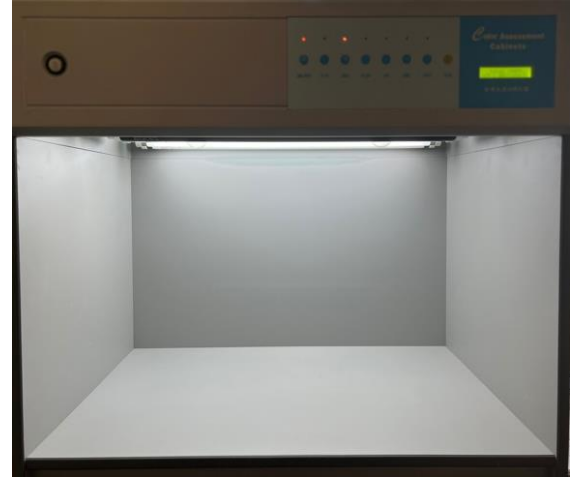
Polisaj işlemi tamamlandıktan sonra, tüm örnekler ultrasonik temizleyicide (VGT-1740QTD, Çin) 15 dakika süreyle distile su içinde temizlenmiştir. Uygulanan polisaj adımlarında kullanılan Diacomp Plus Twist lastik seti Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu sistem, yüzeydeki mikro düzensizlikleri gidererek örneklerin homojen parlaklıkta ve pürüzsüz bir yüzey elde etmesini sağlamıştır.



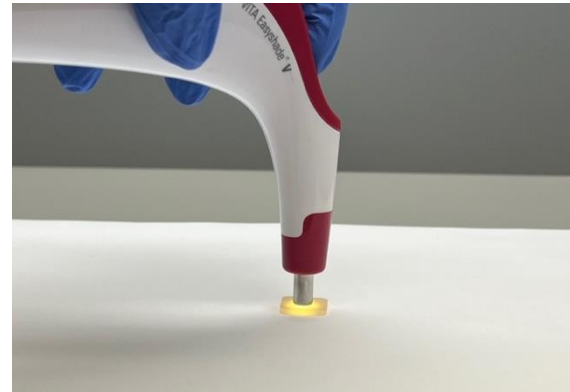
Şekil 4. Diacomp Plus Twist (EVE Ernst Vetter GmbH, Pforzheim, Almanya)

Çalışmada hazırlanan numunelere uygulanan analizler dört ana başlık altında gerçekleştirilmiştir: renk, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve temas açısı analizleri. Numuneler, herhangi bir solüsyonda bekletilmeden doğrudan ölçüm aşamasına alınmıştır. Bu tercih, su emilimi ve yüzey enerjisinde meydana gelebilecek olası değişimleri önlemek amacıyla yapılmıştır.

Renk değerlendirmesi, gün ışığını temsil eden D65 spektral özelliklerine sahip yapay bir aydınlatma altında, standartlaştırılmış bir ölçüm kutusu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Renk ölçümlerinin yapıldığı özel aydınlatmalı ölçüm kutusu Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu amaçla Vita EasyShade V model spektrofotometre (Vita Zahnfabrik, Almanya) kullanılmıştır. Numunelerin her biri beyaz zemin üzerinde, aynı yüzeyden ve merkeze yakın üç farklı noktadan ölçülmüş; her ölçüm öncesinde cihaz, üretici tarafından sağlanan beyaz referans bloğu ile kalibre edilmiştir. Her bir örnek için üç tekrar alınarak CIE L*, a*, b* değerleri ile C ve H parametreleri kaydedilmiştir. Renk ölçüm süreci ve spektrofotometre cihazının uygulama şekli Şekil 6'da ayrıntılı biçimde gösterilmiştir.



Şekil 5. Kullanılan renk ölçüm kutusu



Şekil 6. Renk ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, kontakt profilometre cihazı (Surftest SJ-210, Mitutoyo, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, ölçümler öncesinde 2,950 µm Ra değerine sahip referans bloğu yardımıyla kalibre edilmiştir. Numune yüzeylerinden birbirine paralel üç farklı hat boyunca ölçüm alınmış, bu üç değerın ortalaması hesaplanarak her numuneye ait ortalama Ra değeri belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü analizinde kullanılan Surftest SJ-210 profilometre cihazı Şekil 7'de gösterilmektedir.

Mikrosertlik ölçümleri, TTS Matsuzawa HWM-MT-X3 model Vickers sertlik cihazı (TTS Unlimited Inc., Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numuneye 10 saniye boyunca 100 gramlık yük uygulanmıştır. Cihaz, elmas uçla oluşturulan izin boyutlarını otomatik olarak analiz ederek sertlik değerlerini hesaplamış ve sonuçları VHN (Vickers Hardness Number) cinsinden kaydetmiştir. Hesaplamalarda $HV = 1,8544 \times (P/d^2)$ formülü esas alınmıştır.



Şekil 7. Kullanılan profilometre cihazı

Temas açısı ölçümleri, damla görüntüsünü büyütülmüş olarak gösteren optik sistemli temas açısı ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Analiz sırasında her numune cihaz tablasına sabitlenmiş, yüzeyine mikropipet yardımıyla distile su damlatılmıştır. Damla görüntüsü cihazın optik sistemiyle büyütülerek izlenmiş ve temas açısı manuel olarak ölçülmüştür. Her numune için üç tekrar yapılmış, elde edilen sonuçların ortalaması hesaplanmıştır. Temas açısı ölçümü sırasında kullanılan cihazın ve ölçüm yönteminin genel görünümü Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8. Temas açısı ölçümü

Verilerin istatistiksel analizi IBM SPSS v23.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Normallik dağılımı Shapiro–Wilk testiyle değerlendirilmiş, normal dağılım gösteren parametrelerde grup farklılıkları tek yönlü ANOVA ile analiz edilmiştir. Faktörlerin etkisini karşılaştırmak amacıyla iki yönlü ANOVA uygulanmış, anlamlı fark saptanan

durumlarda çoklu karşılaştırmalar Tukey testi ile yapılmıştır. Tukey çoklu karşılaştırma testi, anlamlı fark belirlenen tüm parametrelerde grup çiftleri arasındaki farklılıkları göstermek amacıyla kullanılmıştır. Bulgular tablolar halinde aritmetik ortalama $\pm$ standart sapma biçiminde sunulmuş ve istatistiksel anlamlılık düzeyi 0,05 olarak kabul edilmiştir.

3. DENEYSEL BULGULAR

Bu çalışmada farklı üretim süreleriyle (20, 40 ve 60 dakika) hazırlanan geçici restorasyon örneklerinin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, temas açısı ve renk parametreleri sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 1, Çizelge 2 ve Şekil 9–10’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Gruplar arasında yüzey pürüzlülüğü açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,138$). Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 20, 40 ve 60 dakika gruplarında sırasıyla $0,22 \pm 0,02 \mu\text{m}$, $0,21 \pm 0,03 \mu\text{m}$ ve $0,20 \pm 0,03 \mu\text{m}$ olarak kaydedilmiştir. Üretim süresinin artmasıyla pürüzlülükte hafif bir azalma eğilimi gözlenmiştir; ancak bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olmaması, baskı süresindeki değişimin yüzey topografisine sınırlı düzeyde etki ettiğini göstermektedir. Şekil 9’da da görüldüğü üzere, pürüzlülük eğrisi üretim süresiyle birlikte kademeli biçimde azalsa da, malzemenin yüzey karakteristiği baskın biçimde sabit kalmıştır.

Vickers mikrosertlik değerleri üretim süresine bağlı olarak anlamlı düzeyde değişim göstermiştir ($p < 0,05$). En düşük ortalama sertlik değeri 20 dakikalık grupta $13,50 \pm 0,95$ VHN iken, 60 dakikalık grupta bu değer $15,47 \pm 0,70$ VHN’ye yükselmiştir. 20 ve 40 dakikalık gruplar arasında fark anlamlı bulunmazken ($p > 0,05$), 60 dakikalık grup her iki gruptan da istatistiksel olarak anlamlı biçimde yüksek sertlik göstermiştir ($p < 0,05$).

Çizelge 1. Farklı üretim süreleriyle hazırlanan geçici restorasyon örneklerinin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve temas açısı ölçüm sonuçları (Ort. $\pm$ SS)

Süre	Pürüzlülük (μm)		Sertlik (VHN)		Temas Açısı ($^\circ$)	
	MD (Min-Max)	MN $\pm$ SD	MD (Min-Max)	MN $\pm$ SD	MD (Min-Max)	MN $\pm$ SD
20 dk	0,21 (0,20-0,27)	$0,22 \pm 0,02^a$	13,38 (12,10-15,40)	$13,50 \pm 0,95^b$	65,75 (61,50-67,50)	$64,90 \pm 2,04^c$
40 dk	0,20 (0,19-0,25)	$0,21 \pm 0,02^a$	15,00 (12,77-15,67)	$14,73 \pm 0,90^b$	69,50 (66,50-73,50)	$69,90 \pm 2,18^b$
60 dk	0,19 (0,16-0,26)	$0,20 \pm 0,03^a$	15,52 (14,13-16,53)	$15,47 \pm 0,70^a$	72,75 (68,50-76,00)	$72,75 \pm 2,60^a$

Aynı sütündeki küçük harfler, her parametre için süreler arasındaki farklılıkları göstermektedir ($p < 0,05$).

Çizelge 2. Farklı üretim süreleriyle hazırlanan geçici restorasyon örneklerinin CIE L*a*b* renk parametreleri, kromatiklik (C) ve ton açısı (h) ölçüm sonuçları

Süre	L*		a*		b*		C		h	
	MD	MN±SD	MD	MN±SD	MD	MN±SD	MD	MN±SD	MD	MN±SD
20 dk	92,25 (91,87-92,50)	92,22±0,20 ^a	1,70 (1,67-1,83)	1,71±0,05 ^a	18,52 (18,10-18,87)	18,47±0,22 ^a	18,62 (18,20-18,90)	18,56±0,21 ^a	95,20 (95,13-95,73)	95,27±0,18 ^b
40 dk	91,79 (91,43-92,30)	91,80±0,25 ^b	1,75 (1,67-1,87)	1,76±0,07 ^a	17,97 (17,83-18,47)	18,02±0,21 ^b	18,07 (18,50-18,90)	18,10±0,20 ^b	95,57 (95,10-95,97)	95,58±0,25 ^a
60 dk	91,72 (91,03-92,23)	91,70±0,39 ^b	1,80 (1,67-1,87)	1,77±0,06 ^a	18,02 (17,77-18,47)	18,04±0,23 ^b	18,09 (17,83-18,57)	18,12±0,24 ^b	95,70 (95,27-95,97)	95,63±0,24 ^a

Renk parametrelerine ait değerler ortalama ± standart sapma (MN±SD) olarak verilmiştir. MD değerleri, ilgili değişkenin minimum ve maksimum aralığını göstermektedir. Aynı sütundaki küçük harfler, her parametre için süreler arasındaki farklılıkları göstermektedir (p<0,05).

Bu artış, üretim süresinin uzamasıyla fotopolimerizasyonun daha etkin gerçekleştiğini ve dolayısıyla ağ yapısının daha yoğun bir şekilde çapraz bağlandığını düşündürmektedir. Uzun süreli ışık maruziyetinin, polimer zincirlerindeki dönüştürülmemiş monomer miktarını azaltarak mekanik dayanımı artırdığı literatürle de uyumludur [13–16].

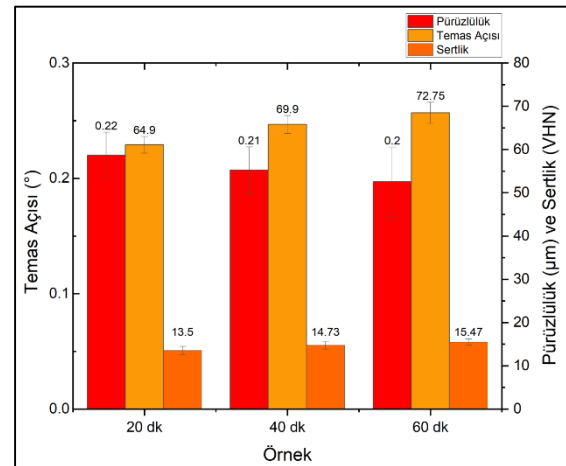
Temas açısı ölçümleri de üretim süresine göre anlamlı farklılık göstermiştir (p < 0,05). Ortalama temas açısı 20 dakikalık grupta 64,90 ± 2,04°, 40 dakikalık grupta 69,90 ± 2,52° ve 60 dakikalık grupta 72,75 ± 2,60° olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da temas açısındaki artış eğilimi açıkça görülmektedir. Üretim süresi uzadıkça yüzey ıslanabilirliği azalmış, bu da yüzey enerjisinde düşüşe işaret etmiştir. Bu durum, daha uzun üretim süresinde oluşan daha yoğun polimer ağ yapısının su moleküllerinin yüzeyle etkileşimini sınırlamasıyla açıklanabilir.

Renk ölçüm sonuçlarına göre, L*, b*, C ve h parametrelerinde gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar saptanırken (p < 0,05), a* parametresinde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir (p = 0,056). L* (açıklık) değeri açısından en yüksek ortalama 20 dakikalık grupta (92,22 ± 0,20), en düşük ise 60 dakikalık grupta (91,70 ± 0,39) kaydedilmiştir. b* (sarı-mavi eksen) değeri 20 dakikalık grupta en yüksek bulunmuştur (18,47 ± 0,19). Buna karşılık, C (kromatiklik) ve h (ton açısı) değerleri üretim süresiyle birlikte anlamlı şekilde artmıştır (p < 0,001 ve p = 0,002).

Özellikle 60 dakikalık grubun daha yüksek C ve h değerleri, renk doygunluğu ve ton stabilitesinin uzun üretim süresiyle arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, daha yüksek

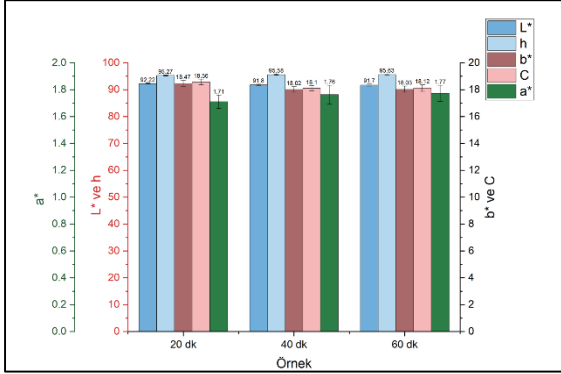
fotopolimerizasyon derecesinin materyalin optik geçirgenliğini artırarak renk parametrelerini etkilediğini düşündürmektedir.

Genel olarak, 3B baskı süresi arttıkça sertlik ve temas açısında anlamlı artış, yüzey pürüzlülüğünde ise istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Renk bileşenlerinden L*, b*, C ve h değerlerindeki farklılıklar, üretim süresinin materyalin optik özellikleri üzerinde etkili olduğunu desteklemektedir. Şekil 9 ve 10, bu eğilimleri görsel olarak özetlemekte; 60 dakikalık üretim süresinin hem mekanik hem de estetik performans açısından daha optimize sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

**Şekil 9.** Örneklerin temas açısı, pürüzlülük ve yüzey sertlik değerleri

Yüzey pürüzlülüğü açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır (p = 0,138). En düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri 60 dakikalık grupta (0,20 ± 0,03µm), en yüksek değer ise 20 dakikalık grupta (0,22 ± 0,02µm) görülmüştür. Üretim süresi arttıkça ortalama pürüzlülük değerlerinde azalma gözlenirse de bu fark

istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmemiştir ($p > 0,05$).



Şekil 10. Örneklerin renk parametreleri değerleri

Mikrosertlik değerleri, üretim süresine göre anlamlı düzeyde farklılık göstermiştir ($p < 0,05$). En düşük ortalama sertlik değeri 20 dakikalık grupta ($13,50 \pm 0,95$ VHN), en yüksek değer ise 60 dakikalık grupta ($15,47 \pm 0,70$ VHN) kaydedilmiştir. 20 dakikalık grup ile 40 dakikalık grup arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmazken ($p > 0,05$), bu iki grubun 60 dakikalık grup ile arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmuştur ($p < 0,05$). Temas açısı ölçümleri de üretim süresine bağlı olarak anlamlı farklılık göstermiştir ($p < 0,05$). En düşük temas açısı 20 dakikalık grupta ($64,90 \pm 2,04^\circ$), en yüksek ise 60 dakikalık grupta ($72,75 \pm 2,60^\circ$) gözlemlenmiştir. Üretim süresi arttıkça temas açısı anlamlı şekilde artmıştır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, üretim süresinin 3B yazıcıyla hazırlanan geçici restorasyon materyalleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; yüzey özellikleri ve renk parametreleri bakımından elde edilen bulgular literatürle karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemesi, baskı süresinin bu parametre üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu düşündürmektedir. Literatürde de benzer sonuçlara ulaşılmış; özellikle baskı sonrası bitirme ve polisaj işlemlerinin, yüzey kalitesi üzerinde baskı parametrelerine kıyasla daha belirleyici olduğu belirtilmiştir [5, 17]. Bununla birlikte, bu çalışmada yüzey standardizasyonu sırasında uygulanan parmak basıncının mekanik olarak tam standardize edilmemesi, ölçümler arasındaki küçük varyasyonlara ve

yüzey pürüzlülüğü değerlerinde istatistiksel fark oluşmamasına katkıda bulunmuş olabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu sürecin mekanik olarak sabit basınç altında yürütülmesi, sonuçların tekrarlanabilirliğini artırabilir.

Renk ölçümlerinde L^* , b^* , C ve h parametrelerinde üretim süresine bağlı istatistiksel farklılıkların saptanması, baskı süresinin artışıyla birlikte renk doygunluğu ve ton açısında belirgin değişimlerin meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, üretim süresinin renk oluşumu üzerindeki etkisinin kısmen sınırlı, buna karşın kullanılan materyalin optik geçirgenlik özelliklerinin daha baskın bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Lee vd. (2022), post-kür süresinin renk parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirirken benzer şekilde üretim süresi ile anlamlı bir ilişki tespit etmemiştir [15]. Bu paralellik, kullanılan fotopolimer rezinlerin renk değişimine karşı belirli bir direnç gösterdiğini desteklemektedir.

Sertlik değerlerinde üretim süresine paralel olarak gözlenen artış, fotopolimerizasyon etkinliğinin üretim süresiyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. En yüksek Vickers sertlik değeri 60 dakikalık üretim süresine sahip grupta ölçülmüştür. Bu bulgu, üretim süresi uzadıkça katmanlar arasında daha güçlü bağlanma ve daha yüksek polimerizasyon derecesi oluştuğunu düşündürmektedir. Kim vd. (2020), üretim sırasında ışık maruziyet süresinin uzamasının monomer dönüşüm oranını artırarak mekanik dayanımı olumlu yönde etkilediğini bildirmiştir [18]. Lee vd. (2022) de post-kür süresinin renk parametreleri üzerindeki etkisini incelemiş ve üretim süresiyle anlamlı bir ilişki bulunmadığını rapor etmiştir [15].

Bu sonuçlar, çalışmamızda gözlenen mekanik güçlenmenin daha çok üretim sırasında gerçekleşen fotopolimerizasyon süreciyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Üretim parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri yalnızca üretim süresiyle sınırlı değildir; katman kalınlığı, ışık şiddeti ve maruziyet süresi gibi değişkenler de önemli rol oynamaktadır. Liu vd. (2021), artan katman kalınlığının katmanlar arası bağlanmayı zayıflatarak yüzey pürüzlülüğünü artırdığını

bildirmiştir [19]. Benzer biçimde, Sahrir vd. (2025), düşük ışık şiddeti altında üretilen örneklerin daha düşük polimerizasyon derecesine sahip olduğunu ve bunun sertlik değerlerini olumsuz etkilediğini göstermiştir [20]. Bu bulgular, çalışmamızda üretim süresi uzadıkça gözlenen sertlik artışının, daha uzun ışık maruziyetine bağlı olarak artan polimerizasyon etkinliğiyle uyumlu olduğunu desteklemektedir. Ayrıca, temas açısı ölçümlerinde gözlenen artışın da yüzeyin mikroyapısal yoğunluğundaki artışla bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

Temas açısı ölçümleri, üretim süresi arttıkça örneklerin yüzeyinde daha hidrofobik bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Bu durum, daha uzun baskı süresinin yüzey topografyasını etkileyerek sıvı ile temas eden alanların azalmasına neden olduğunu düşündürmektedir. Üretim süresi arttıkça temas açısı değerlerinde artış gözlenmiş, bu durum yüzeyin daha hidrofobik özellik kazanmasına işaret etmektedir. Bu artış, daha uzun polimerizasyon süresinin yüzeydeki serbest enerji miktarını azaltması ve hidrofilik grupların yüzey altına gömülmesiyle ilişkili olabilir.

Sonuç olarak, elde edilen veriler, geçici restorasyonların üretiminde baskı süresinin özellikle sertlik ve temas açısı gibi özellikler üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu; buna karşın renk ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerde etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Benzer şekilde, Soto-Montero vd. (2022) çalışmasında da baskı süresi ve ışık maruziyetinin renk parametreleri ile yüzey ıslanabilirliği üzerinde doğrudan etkili olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar, üretim süresinin optimize edilmesiyle klinik açıdan daha dayanıklı, estetik olarak daha kararlı ve hasta memnuniyetini artıran restorasyonların elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı üretim sürelerine sahip 3B baskı geçici restorasyon materyallerinin renk parametreleri, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve temas açısı özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, üretim süresinin materyalin yüzey ve optik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Üretim süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma eğilimi gözlenmiş, ancak bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu durum, kısa üretim sürelerinin daha düzgün yüzey oluşumuna kısmen katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, üretim süresinin artışıyla birlikte yüzey sertliğinde ve renk parametrelerinde değişimin arttığı gözlenmiştir. Bu bulgu, uzun sürede polimerize edilen örneklerde artan ışık maruziyetinin materyalin polimerizasyon derecesini yükselterek fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, 3B baskı ile geçici restorasyon üretiminde kullanılan baskı süresi, restorasyonun yüzey kalitesi ve estetik başarısı açısından kritik bir parametredir. Klinik uygulamalarda, üretim süresinin kontrollü biçimde optimize edilmesi, hem materyalin biyouyumluluğu hem de estetik performansı bakımından daha tutarlı ve dayanıklı restorasyonların elde edilmesine olanak sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Song S-Y, Shin Y-H, Lee J-Y, Shin S-W., "Color stability of provisional restorative materials with different fabrication methods", *Journal of Advanced Prosthodontics*, Vol. 12, Pages 259-266, 2020.
2. Oberoi G, Nitsch S, Edelmayer M, Janjić K, Müller AS, Agis H., "3D Printing—Encompassing the Facets of Dentistry", *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 6, Page 172, 2018.
3. Alharbi N, Alharbi S, Cuijpers VMJI, Osman RB, Wismeijer D., "Three-dimensional evaluation of marginal and internal fit of 3D-printed interim restorations fabricated on different finish line designs", *Journal of Prosthodontic Research*, Vol. 62, Pages 218-226, 2018.
4. Alamo L, Cassiano FB, Bordini EAF, Stuanı VT, Pacheco LE, Gallinari MDO, "An organotypic model of oral mucosa cells for the biological assessment of 3D printed resins for interim restorations", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 132, Pages 251-259, 2024.
5. Revilla-León M, Meyers MJ, Zandinejad A, Özcan M., "A review on chemical composition, mechanical properties, and manufacturing work flow of additively manufactured current polymers for interim dental restorations", *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, Vol. 31, Pages 51-57, 2019.

6. Tian Y, Chen C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K., “A review of 3D printing in dentistry: technologies, affecting factors, and applications”, *Scanning*, Vol. 2021, Pages 1-19, 2021.
7. Lin L, Fang Y, Liao Y, Chen G, Gao C, Zhu P., “3D printing and digital processing techniques in dentistry: a review of literature”, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 21, Article 1801013, 2019.
8. Schweiger J, Edelhoff D, Güth J-F., “3D printing in digital prosthetic dentistry: an overview of recent developments in additive manufacturing”, *Journal of Clinical Medicine*, Vol. 10, Article 2010, 2021.
9. Wuerschling SN, Hickel R, Edelhoff D, Kollmuss M., “Initial biocompatibility of novel resins for 3D printed fixed dental prostheses”, *Dental Materials*, Vol. 38, Pages 1587-1597, 2022.
10. Yavuz E, Yılmaz S., “Diş hekimliğinde yeni ve hızla ilerleyen üretim teknolojisi: 3 boyutlu yazıcılar”, *Akdeniz Tıp Dergisi*, Cilt. 7, Sayfa 197-205, 2021.
11. Zhang Z, Li P, Chu F, Shen G., “Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy”, *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*, Vol. 80, Pages 194-204, 2019.
12. Tahayeri A, Morgan M, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, “3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials”, *Dental Materials*, Vol. 34, Pages 192-200, 2018.
13. Topsakal KG, Aksoy M, Sükut Y, Duran GS., “Effect of post-curing parameters and material thickness on the color stability of 3D-printed dental resins: An in vitro study”, *International Orthodontics*, Vol. 23, Article 100985, 2025.
14. Aktug Karademir S, Atasoy S, Akarsu S, Karaaslan E., “Effects of post-curing conditions on degree of conversion, microhardness, and stainability of 3D printed permanent resins”, *BMC Oral Health*, Vol. 25, Article 304, 2025.
15. Lee E-H, Ahn J-S, Lim Y-J, Kwon H-B, Kim M-J., “Effect of post-curing time on the color stability and related properties of a tooth-colored 3D-printed resin material”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 126, Article 104993, 2022.
16. Soto-Montero J, de Castro EF, Romano B de C, Nima G, Shimokawa CA, Giannini M., “Color alterations, flexural strength, and microhardness of 3D printed resins for fixed provisional restoration using different post-curing times”, *Dental Materials*, Vol. 38, Pages 1271-1282, 2022.
17. Al-Dulaijan YA, Alsulaimi L, Alotaibi R, Alboainain A, Alalawi H, Alshehri S, “Comparative evaluation of surface roughness and hardness of 3D printed resins”, *Materials*, Vol. 15, Article 6822, 2022.
18. Hassanpour M, Narongdej P, Alterman N, Moghtadernejad S, Barjasteh E., “Effects of post-processing parameters on 3D-printed dental appliances: a review”, *Polymers*, Vol. 16, Article 2795, 2024.