

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ
RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİ ANABİLİM DALI

BULK-FİLL REZİN KOMPOZİTLERİN POLİMERİZASYON BÜZÜLMESİ
HACİMSEL DEĞİŞİMİNİN MICRO-CT ARACILIĞI İLE İNCELENMESİ

Dt. İlker AYAZ

DİŞ HEKİMLİĞİNDE UZMANLIK TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Çağatay BARUTÇUGİL

2022- ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ
RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİ ANABİLİM DALI

BULK-FİLL REZİN KOMPOZİTLERİN POLİMERİZASYON BÜZÜLMESİ
HACİMSEL DEĞİŞİMİNİN MICRO-CT ARACILIĞI İLE İNCELENMESİ

Dt. İlker AYAZ

DİŞ HEKİMLİĞİNDE UZMANLIK TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Çağatay BARUTÇUGİL

Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü
(BAP) tarafından TDH-2021-5755 proje numarası ile desteklenmiştir.

2022- ANTALYA

ONAY SAYFASI

(EK 3)

Dt. İlker Ayaz tarafından sunulan bu çalışma jürimiz tarafından **oy birliği/oy çokluğu** ile..... Anabilim Dalında Uzmanlık Tezi olarak kabul edilmiştir. .../...../.....

İmza

Üye :
(Ünvanı, Adı Soyadı) (Üniversite)

Üye :
(Ünvanı, Adı Soyadı) (Üniversite)

Üye :
(Ünvanı, Adı Soyadı) (Üniversite)

Bu tez,/...../..... tarih ve/..... sayılı Yönetim Kurulu kararıyla belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Diş Hekimliği Fakültesi

Kurum Yöneticisi

ETİK BEYAN

(EK 4)

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı beyan ederim.

Dt. İlker Ayaz

İmza

Prof. Dr. Çağatay Barutçugil

İmza

TEŞEKKÜR

Uzmanlık eğitimimde ve bu tezin oluşturulmasında çok büyük emekleri olan,bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, hoşgörüsünü ve manevi desteğini her zaman hissettiren değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Çağatay Barutçugil'e,

Eğitimim boyunca teorik ve pratik anlamda deneyimlerini, yardımlarını ve anlayışlarını esirgemeyen hocalarım Doç. Dr. Ayşe Dünder'a ve Prof. Dr. Osman Tolga Harorlı'ya,

Jürimde yer almasından onur duyduğum kıymetli hocam Doç. Dr. Gülbike Demirel'e,

Birlikte çalışmaktan keyif aldığım asistan arkadaşlarım ve yardımcı personele,

Bugünlere gelmemde çok büyük katkıları olan,yaşamımın her döneminde sevgilerini,desteklerini ve fedakarlıklarını esirgemeyen canım annem Hatice Ayaz'a ve canım babam Özcan Ayaz'a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı farklı uygulama tekniklerine ve içeriğe sahip güncel bulk-fill rezin kompozitlerin, standart ve yüksek ışık gücü moduna sahip ışık cihazı ile polimerize edilmelerinin ardından polimerizasyon büzülmesi sonucu meydana gelen hacimsel boyut değişikliklerinin bilgisayarlı mikro tomografi (mikro-CT) kullanılarak değerlendirilmesidir.

Yöntem: Bu çalışmada altı adet rezin esaslı bulk-fill kompozit; SonicFill 2 (Kerr Dental, Brea, CA, ABD), VisCalor (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), AdmiraFusion Extra (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), Filtek Bulkfill (3M Espe, St.Paul, MN, ABD), Fill-Up (Coltene Whaledent, Alstatten, İsviçre) ve GrandioSO Heavy Flow (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya) kullanılmıştır. Bulk-fill rezin kompozitler, herhangi bir restorasyon ya da çürük içermeyen çekilmiş molar dişlerde oluşturulan 4,2 ($\pm 0,5$) mm çapında ve 4 ($\pm 0,5$) mm derinliğindeki Sınıf 1 kavitelere üreticilerinin önerileri ile uygulanmıştır. Kompozitler 2 farklı ışıklandırma modu, standart ve yüksek güç modlarında polimerize edilmek üzere 2 alt gruba ayrılmıştır. Tüm örnekler için, dişlerin boş kavite hacimleri ve sonrasında ise bulk-fill rezin kompozitler kaviteye yerleştirildikten sonra polimerizasyondan önce ve sonra olmak üzere her bir örnek için üçer kez olmak üzere mikro-CT ile 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Ardından materyaller nicel ve nitel olarak hacimsel birbirleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Verilerin, tek yönlü varyans analizi (ANOVA), Duncan çoklu karşılaştırma testi ve bağımsız t-testi ile analiz edilmiştir. ($p < 0,05$)

Bulgular: Bulk-fill rezin kompozitlerin, kaviteye yerleştirildikten sonra meydana gelen adaptasyon mikrobosluğu en düşük oranda VisCalor grubunda, en yüksek oranda ise Fill-Up grubunda görülmüştür. Polimerizasyon büzülmesi hacimsel oranlarına bakıldığında ise, düşük ışık gücü uygulandığında en düşük oran Sonic Fill 2, en yüksek oran AdmiraFusion grubunda bulunmuştur. Yüksek ışık gücü uygulandığında ise en yüksek hacimsel büzülme oranı Sonic Fill 2 grubunda görülmüştür. Polimerizasyon sonrası kavite ile bulk-fill rezin kompozit arasında oluşan mikrobosluk oranına bakıldığında, en yüksek oran hem yüksek hem düşük ışık gücü grubunda AdmiraFusion grubunda gözlenmiştir. Yüksek ışık gücü

uygulandığında, bütün kompozitlerde hacimsel büzülme ve mikroboşluk oranı artmakla birlikte, istatistiksel olarak anlamlı artış sadece Sonic Fill 2 grubunda görülmüştür.

Sonuç: Çalışmada kullanılan tüm bulk-fill rezin kompozitler, hem hacimsel büzülme, hem de mikroboşluk oranlarına bakıldığında birbirlerinden farklı değerler göstermektedir. Yüksek ışık gücü uygulaması, bütün rezin kompozitlerin büzülme ve mikroboşluk oranlarını arttırmaktadır.

Anahtar kelimeler: Bulk fill rezin kompozit, polimerizasyon b z lmesi, bilgisayarlı mikro tomografi, ışık g c 



ABSTRACT

MICROCOMPUTED TOMOGRAPHY EVALUATION OF POLYMERIZATION SHRINKAGE OF DIFFERENT BULK FILL RESIN COMPOSITES

Objective: This study aimed to quantify polymerization shrinkage of six bulk-fill composites, under standard and high light power conditions, in Class I cavity preparations using 3D microcomputed tomography (μ CT).

Materials and Methods: Preparations 4,2 ($\pm 0,5$) mm diameter and 4 ($\pm 0,5$) mm depth were made in 60 human extracted molars ($n=5$). Six bulk-fill composites were tested, SonicFill 2 (Kerr Dental, Brea, CA, USA), VisCalor (Voco GmbH, Cuxhaven, Germany), AdmiraFusion Extra (Voco GmbH, Cuxhaven, Germany), Filtek Bulkfill (3M Espe, St.Paul, MN, USA), Fill-Up (Coltene Whaledent, Alstatten, Switzerland) and GrandioSO Heavy Flow (Voco GmbH, Cuxhaven, Germany). Teeth were divided into six groups according to restorative material used and subdivided into two subgroups, according to the presence of a light-power (standard light power mode (1000 mW / cm²) and high light power mode (1400 mW / cm²)). Each tooth was scanned three times: (1) after cavity preparation, (2) before and (3) after composite light-curing. Acquired μ CT images were imported into 2D and 3D software for analysis.

Results: When void ratio after the adaptation of the Bulk-fill resin composites to the cavity were examined, the lowest rate was observed in the VisCalor group and the highest rate was observed in the Fill-Up group. The volumetric polymerization shrinkage was examined, the lowest rate was found in Sonic Fill 2 and the highest rate in AdmiraFusion group when low light power was applied. Sonic Fill 2 group presented the highest volumetric polymerization shrinkage while bulk fill composites were cured with high light power. After curing, AdmiraFusion group showed the highest void ratio among all bulk fill composites in both the high and low light power groups. Significantly different volumetric shrinkage and void between high and standard light power conditions was observed only for Sonic Fill 2 group ($p < 0.05$), high light power presented significantly higher volumetric shrinkage and void.

Conclusions: All bulk-fill resin composites that used in the study show different values from each other when both volumetric polymerization shrinkage and void ratios are considered. The curing with high light power increases the volumetric polymerization shrinkage and void ratio of all resin composites.

Keywords: Bulk fill resin composite, polymerization shrinkage, microcomputed tomography, light power



İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER	x
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xii
TABLolar	xv
ŞEKİLLER.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1. Rezin Kompozitler	2
2.1.1. Rezin Kompozitlerin Tarihçesi	2
2.1.2 Rezin Kompozitlerin Yapısı.....	2
2.2 Rezin Kompozitlerde Polimerizasyon Büzülmesi	6
2.2.1 Polimerizasyon Kinetiği.....	6
2.2.2 Polimerizasyon büzülmesi ve büzülme stresi	7
2.2.3 Polimerizasyon Büzülmesini Azaltmak için Uygulanan Teknikler	8
2.3 Bulk-Fill Rezin Kompozitler	11
2.3.1. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerde Kür Derinliği	12
2.3.2. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerde Polimerizasyon Büzülmesi.....	14
2.3.3. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerde Marjinal Boşluk Oluşumu	14
2.3.4. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerin Fiziksel ve Estetik Özellikleri.....	15
2.4. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	16
2.4.1 Kondanse Edilebilen Geleneksel Bulk-Fill Rezin Kompozitler	16
2.4.2 Akışkan Bulk-Fill Rezin Kompozitler	16
2.4.3. Sonic Aktive edilen Bulk-Fill Rezin Kompozitler.....	17
2.4.4. Dual-cure Bulk-fill Rezin Kompozitler	17
2.4.5. Ön Isıtmalı Bulk-fill Rezin Kompozitler	17
2.4.6. Ormocer Bazlı Bulk Fill Rezin Kompozitler	18
2.5. Hacimsel Polimerizasyon Büzülmesi Ölçüm Yöntemleri.....	18
2.5.1. Cıva Dilatometresi Yöntemi	18
2.5.2. Su Dilatometresi Yöntemi.....	19

2.5.3. Gaz Piknometresi Yöntemi	19
2.5.4. Buoyancy Yöntemi	19
2.5.6. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (μ CT) Yöntemi	20
2.6. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (μ CT).....	20
2.6.1. Micro-CT Aracılığı ile Diş Dokularının Ölçümü.....	21
2.6.2. Polimerizasyon Büzülmesi Kaynaklı Hacimsel Kaybın Micro-CT ile Değerlendirilmesi.....	21
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	23
3.1. Dişlerin toplanması	23
3.2. Materyal Seçimi	23
3.3. Numunelerin Hazırlanması	25
3.4. Mikro-CT Tarama Prosedürü.....	27
3.5. Mikro-CT Analizleri	29
3.6. Hacimsel Değişikliklerin Hesaplanması	31
3.7. İstatistiksel Analiz.....	32
4. BULGULAR.....	33
4.1. Düşük Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Hacimsel Büzülme Bulguları	33
4.3. Düşük Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları.....	35
4.4. Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Hacimsel Büzülme Bulguları	36
4.5.Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları.....	37
4.6. Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları.....	38
4.7. Bulk-Fill RBC'lerin Farklı Işık Gücü Seviyeleri ile Polimerize Edilmesinin Etkilerine Ait Bulgular	39
5. TARTIŞMA.....	41
6. SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	Alüminyum
ANOVA	Analysis of Variance
Ark	Arkadaşları
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BRBC	Bulk-Fill Rezin Kompozit
Bis-GMA	Bisfenol A-glisidil metakrilat
BPDM	Bifenil dimetakrilat
BT	Bilgisayarlı Tomografi
CQ	Kamforokinon
Cu	Bakır
dk	Dakika
DMAEMA	N,N-dimetilaminoetil metakrilat
DMAB	Etil p-dimetilaminobenzoat
EGDMA	Etilen glikol dimetakrilat
FEM	Sonlu Elemanlar Modeli
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
GPDM	Gliserol fosforik asit dimetakrilat
ISO	International Organization for Standardization
Ivocerin	Bis-(4-metoksibenzoil)dietil-germane
kVp	Kilovoltaj

LED	Light-Emitting-Diode
µm	Mikrometre
mA	Miliamper
mm	Milimetre
mm²	Milimetrekaire
mm³	Milimetrekaireküp
mikro-CT	Bilgisayarlı Mikro Tomografi
µCT	Bilgisayarlı Mikro Tomografi
MMA	Metil metakrilat
MDP	Metakridiiloksidil dihidrojen fosfat
MDPB	Metakriloiloksidodesilpiridinyum bromür
MPa	Mega Paskal
mW	Mili watt
nm	Nanometre
OPPI	P-oktiloksifenil-fenil iyodonyum heksafloroantimonat
PPD	1-fenil-1,2-propandion
ppm	Milyonda bir birim
pH	Power of Hydrogen (Hidrojenin gücü)
QTH	Kuvars tungsten halojen
RPM	Dakikadaki devir sayısı
RBC	Rezin Kompozit

sn	Saniye
TEGDMA	Trietilenglikol dimetakrilat
TiO₂	Titanyum Dioksit
TPO	Difenil(2,4,6 trimetilbenzoil) fosfin oksit
UV	Ultraviyole
UDMA	Üretan dimetakrilat
VH	Vickers sertliği
%	Yüzde

TABLÖLAR

Tablo 3.2.1: Çalışmada kullanılan bulk-fill RBC'lerin yapısı

Tablo 3.3.1: Çalışma grupları ve uygulama prosedürleri

Tablo 3.6.1: Hacimsel değişikliklerin hesaplanması

Tablo 4.7.1: Rezin Kompozitin Hacimsel Büzülmesi

Tablo 4.7.2: Rezin Kompozitin Kaviteye Adaptasyon Sonrası Oluşan Mikroboşluk Oranı

Tablo 4.7.3: Kavite ile Polimerize olmuş Rezin Kompozit Arasındaki Mikroboşluk Oranı

ŞEKİLLER

Şekil 3.2.1: Çalışmada kullanılan bulk-fill RBC'ler

Şekil 3.3.1: Kaviteler oluşturulurken kullanılan 4,2 mm çapındaki disk şekilli elmas frez

Şekil 3.3.2: Numunelerin hazırlanması

Şekil 3.4.1: İstenmeyen polimerizasyonu önlemek için kompozit uygulanmış numunenin opak plastik örtü ile örtülmesi

Şekil 3.4.2: Her numunesine kompozit uygulanmış olan örnek bir grubun, polimerizasyon öncesi rezin kompozit hacminin ölçümü için Micro-CT cihazına yerleştirilmesi

Şekil 3.4.3: Diğer numuneler opak plastik örtü ile korunmaya devam ederken rezin kompozit polimerizasyonunun gerçekleştirilmesi

Şekil 3.5.1: Ölçümlerin gerçekleştirildiği Micro-CT cihazı

Şekil 3.5.2: Tarama sonrası NRecon yazılımı ile rekonstrüksiyon

Şekil 3.5.3: Ctan yazılımı ile 3 boyutlu analiz edilecek bölgenin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi

Şekil 3.5.4: Region of interest, yani analiz edilecek alanın her kesitte ayrı ayrı belirlenmesi

Şekil 4.1.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranları

Şekil 4.2.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin kaviteye adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları

Şekil 4.3.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları

Şekil 4.4.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranları

Şekil 4.5.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin kaviteye adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları

Şekil 4.6.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları



1. GİRİŞ

Diş hekimliğinde kullanılan restoratif dental materyaller, güncel yaklaşımlar ve teknolojideki ilerlemelerle birlikte gelişimlerini sürdürmektedirler.

Polimerizasyon büzülmesi, rezin esaslı materyallerin polimerizasyonları sırasında, metakrilat monomerlerin, polimere dönüşümü ile meydana gelen hacimsel boyut kaybıdır ve bu rezin esaslı materyallerin yapısal bir özelliğidir. Bu hacimsel boyut kaybı sebebiyle diş ile restorasyon arasında gerçekleşen ve polimerizasyon büzülme stresleri adı verilen gerilme kuvveti rezin esaslı restorasyonların başarısızlık nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir.(1)

Polimerizasyon büzülmesi streslerini azaltmak ve olası başarısızlıkların önüne geçmek için geleneksel olarak rezin kompozitlerin azami 2 mm'lik tabakalar halinde kaviteye yerleştirilmeleri önerilmektedir. Ancak, günümüz diş hekimliği uygulamalarında kullanım kolaylığı sağlamak için teknolojik gelişmelerle birlikte kaviteye 4 mm ya da 5 mm tek tabaka halinde uygulanabilen ve bulk-fill rezin kompozitler (BRBC) adı verilen rezin kompozitler (RBC) geliştirilmiştir. Bulk-fill RBC'ler, 4 mm veya daha kalın tabakalar şeklinde uygulanabilirken, yapısal olarak içerdiği monomerlerin moleküler ağırlığının arttırılması, yeni stres giderici monomerlerin eklenmesi ve üçüncü bir reaktif alan içeren metakrilat monomerlerin dahil edilmesi gibi bazı kimyasal modifikasyonlar ile geleneksel rezin kompozitlere kıyasla, polimerizasyon büzülmesi miktarlarını azalttığı iddia edilmektedir.(2, 3) Ancak, tek tabaka halinde uygulamanın bir dezavantajı olan kaviteye yeteri kadar adapte olamama sorununun üstesinden gelmek amacıyla, üreticiler sonik aktivasyon veya termo-viskoz yöntemle uygulanan ya da viskozitesi azaltılmış ürünler gibi çeşitli modifikasyonlara sahip bulk-fill RBC'leri piyasa sürmüşlerdir.

Bu çalışmada, günümüzde en güncel olarak kullanılan yeni nesil bulk-fill RBC'lerin, bilgisayarlı mikro tomografi (mikro-CT) cihazı kullanılarak kaviteye adaptasyon ve hacimsel polimerizasyon büzülmesi davranışlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Rezin Kompozitler

2.1.1. Rezin Kompozitlerin Tarihçesi

İlk dental rezin kompozitler, 1950'lerde, güçlendirme amaçlı eklenen kuvars parçacıklarını içeren, kendi kendine sertleşen polimetil metakrilat olarak tanıtılmıştır (4). Bu kompozitler, iki pasta şeklinde bulunan ve karıştırılarak hazırlanan kendi kendine sertleşen sistemler olarak üretilmekteydi. Daha sonra sisteme bir ultraviyole (UV) foto başlatıcının dahil edilmesi ile, UV ışığı ile polimerize olan tek bir macun sistemi üretildi. (5) Ancak bu sistemlerde, hekim ve personelin UV ışığına maruz kalması ile ilgili sağlık endişeleri ve sınırlı sertleşme (kürleme) derinliği gibi sebeplerle alternatif bir ışıkla sertleştirme sistemi araştırılmış. 1970'lerin sonlarında, kamforkinonun (CQ) piyasaya sürülmesiyle beraber, kuvars tungsten halojen (QTH) kaynağından gelen görünür mavi ışıkla polimerize olan, kompozitin formülasyonuna da bağlı olarak daha fazla kür derinliğine (yani tipik olarak 2 mm) sahip yeni bir sistem üretilmiştir. İlerleyen dönemlerde üretilen dimetakrilat (UDMA) gibi alternatif monomer sistemleri, dolduruculardaki gelişmeler gibi ilerlemelerle rezin kompozitler gelişimlerini sürdürmüşlerdir.

2.1.2 Rezin Kompozitlerin Yapısı

Tipik olarak, rezin kompozitler (RBC) organik polimer matris fazı, inorganik faz ve ara faz olmak üzere üç ana bileşenden oluşurlar (6).

Rezin **matris**, monomerler ve ko-monomerler, fotopolimerizasyon başlatıcılar, hızlandırıcılar, inhibitörler ve renk bileşenlerini içermektedir.(7) Dr. Rafael Bowen tarafından, 1960'ların başlarında, özellikle bisfenol A glisidil metakrilat'ın (Bis-GMA) üretilmesi modern kompozitlerin çağı başlamıştır. Uzun yıllar boyunca Bis-GMA dimetakrilat molekülü RBC'lerin ana omurgası olarak kullanılmıştır. Bis-GMA son derece viskozdur ve bu yüzden daha düşük moleküler ağırlıklı dimetakrilatlarla seyreltilmesi gerekir.(8) Dimetakrilat bazlı matrisler, yüksek oranda çapraz bağ, iyi mekanik özellik, nispeten düşük su emme ve çözünürlük, yüksek doldurucu oranına uyum, yeterli yarı saydamlık gibi özellikleri içerir ve polimerizasyon büzülmesinin azaltılmasını sağlar.(4) Trietilenglikol dimetakrilat

(TEGDMA), mekanik özellikleri ve renk stabilitesini azaltırken su emilimini artırır. Üretan dimetakrilat (UDMA) kopolimeri ise, eğilme dayanıklılığını, elastisite modülünü ve sertliği artırma özelliğine sahiptir.(9)

Rezin matrislerin içeriği, üreticilerin hedefleri doğrultusunda çeşitlendirilmeye devam etmektedir. Örneğin, akışkanlığı modifiye etmek adına rezin matrise eklenen düşük viskoziteli monomerlere örnek olarak; bisfenol A dimetakrilat (Bis-DMA), etilen glikol dimetakrilat (EGDMA), metil metakrilat (MMA) verilebilir.(10) Bununla birlikte bazı self-adeziv RBC'ler, diğer metakrilatlarla çapraz bağlanma ve kopolimerizasyon yapabilen, dışın mineral içeriği ile kimyasal bağlanma potansiyeli olan ve kendi kendine dağlanan dimetakrilat monomeri gliserol fosfat dimetakrilat (GPDM) içerir.(11) Ayrıca antibakteriyal etkilerinden dolayı, kuaterner amonyum metakrilatlar kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır ve bakterisidal etkileri ve bakteriyel yapışmayı azaltabildiklerinden dolayı RBC'lere dahil edilmişlerdir.(12) Dimetilaminododesil metakrilat (DMAHDM), bis(2 metakriloiloksietil) dimetil amonyum bromür (QADM), metakriloiloksi dodesil piridinyum bromür (MDPB) kuaterner amonyum polietilenin örnekleridir. Bununla birlikte, bir Bis-EMA rezinine PMGDM (piromellitik gliserol dimetakrilat) gibi asidik monomerlerin dahil edilmesinin, çürük oluşumunu önlemek adına restorasyonun kalsiyum ve fosfat iyonunu serbest bırakma potansiyelini arttırdığı gösterilmiştir.(13) Ayrıca son zamanlarda bazı araştırmacılar, rezin yapısını değiştirerek polimerizasyon büzülmesini azaltmaya odaklanmışlardır. Bu amaçla, rezin olarak sıvı kristal monomerleri denemiştir. Bu monomerin, ışıkla sertleştirildiğinde nematik fazının izotropik amorf duruma geçişinden dolayı daha az küçüldüğü bulunmuştur.(14) Benzer şekilde, oksetanlar (15), oksibismetakrilatlar (16) ve yüksek oranda dallanmış metakrilatlar gibi polimerizasyon büzülmesini ve bununla ilişkili stresleri azaltmak amacıyla geliştirilmiş bazı monomerler de araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Metakrilat bazlı rezinlerle kopolimerize edilebilen spiro-orto esterler (17) ve vinil siklopropan (18) türevleri gibi halka açıcı moleküller, silseskioksan (SSQ) monomerleri (19), sol-jel reaksiyonundan sonra sırasıyla 2 ve 4 siloksan bağı üretebilen dimetildietoksisilan veya tetraetoksisilan (20) gibi monomerler yine polimerizasyon büzülmesi azalmak amacıyla rezin kompozitlerin yapısında kullanılması araştırılmıştır.

Farklı polimerizasyon teşvik edici sistemler geliştirmek için girişimlerde bulunulmasına rağmen, çoğu RBC, ya tek polimerizasyon başlatıcısı aracılığıyla ışıqla ya da ek olarak kimyasal olarak sertleştirilmiş bir bileşen içererek, dual-cure formülasyonunda aktive edilir. En yaygın fotobaşlatıcı sistem, tipik olarak aromatik olan üçüncül bir amin tarafından hızlandırılan kamforokinondur.(21) Kamforokinon (CQ), çapraz bağlanma polimerizasyonunu başlatan serbest radikaller üretmek için N,N-dimetilaminoetil metakrilat (DMAEMA) veya etil p-dimetilaminobenzoat (DMAB) gibi bir amin indirgeyici ajan ile reaksiyona giren uyarılmış bir durum oluşturur. CQ'nun absorpsiyon spektrumu, 470 nm'de pik olmakla birlikte 450-500 nm dalga boyu aralığında yer alır.(22) CQ alternatif olarak, bir yardımcı başlatıcıya ihtiyaç duymadan radikaller oluşturmak için fotodekompozisyona uğrayan benzoilgermanyum türevleri araştırılmıştır. Bazı ticari rezin kompozit formülasyonlarında, CQ'dan daha az sarı olan PPD (1-fenil-1,2-propandion) (23), Lucirin TPO (monoasilfosfin oksit) ve Irgacure 819 (bisasilfosfin oksit) (24) gibi başka fotobaşlatıcıları yer almış ve böylece potansiyel olarak daha fazla renk kararlılığı sağlandığı iddia edilmiştir. OPPI (p-oktiloksifenil-fenil iyodonyum heksafloroantimonat) gibi ek fotobaşlatıcılar, önemli deneysel sonuçlara dayanarak önerilmiştir (24). Son yıllarda restoratif diş hekimliğinde en güncel materyaller arasında yer alan bulk-fill RBC'ler, CQ, fosfin oksit ve Ivocerin gibi germanyum bazlı foto başlatıcı kombinasyonları ile içermektedir ve 4-5 mm kalınlıkta tabakalar halinde uygulanabilmesi sağlanmıştır. CQ, Lucirin TPO'dan daha reaktiftir ve daha fazla kür derinliği ile daha hızlı polimerizasyona neden olur. (25)

Günümüzde ağırlıkça RBC'nin büyük bir kısmını doldurucu maddeleri oluşturmaktadır. Doldurucular temel olarak, polimerizasyon büzülmesini ve oluşan gerilimi azaltmak, rezin matrisini güçlendirmek ve yarı saydamlık gibi malzemenin optik özelliklerini geliştirmek için rezin matrise eklenirler ve ince öğütölmüş kuvars veya cam, sol-jel türevli seramikler, ince silika ya da nanopartiköl boyutlarında değişkenlik gösteren inorganik partiküllerdir. Modern RBC'ler kuvars, koloidal silika içermekle birlikte; baryum, stronsiyum ve zirkonyum vb. içeren silika cam doldurucu maddeleri içerir.(26)

Nanobilim veya moleköler mühendislik olarak da bilinen nanoteknoloji, 0.1-100 nanometre (nm) aralığında karakteristik boyutları olan fonksiyonel malzeme ve yapıların oluşturulması olarak tanımlanmaktadır. RBC'deki inorganik fazlar nano

boyuta ulaştığında, nanokompozitler olarak adlandırılırlar. Nanofilller piroliz ve sol-jel işlemleri gibi çeşitli tekniklerle hazırlanabilir.(26) Polimerizasyon büzölmesi esas olarak rezin matrisinden kaynaklandığından, doldurucu miktarındaki artış, nanokompozitlerde daha düşük miktarda rezin ile sonuçlanır, bu durum polimerizasyon büzölmesini önemli ölçüde azaltacak ve nanokompozitlerin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirecektir. Günümüzde, piyasada birçok modifiye edilmiş nanofill iğerikli RBC bulunmaktadır. Nanofil dolduruculara ek olarak, rezin kompozitlerde özellikle fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmek için farklı doldurucu tipleri kullanılması da gündeme gelmiştir. Bu amaçla, fibriler silikat tek kristalleri içeren nanofiberler kullanımı araştırılmıştır. (27) Benzer şekilde kısa E-cam fiberli nanohibrit rezin kompozitler (28), TiO₂ nanopartikülleri (<20 nm) (29) veya dikalsiyum fosfat anhidroz (DCPA) nanoparçacıkları ve tetrakalsiyum fosfat (TTCP: Ca₄(PO₄)) gibi kalsiyum ve fosfat iyonu salan dolduruculara sahip rezin kompozitler geliştirilmiştir.(30)

Üreticiler, rezin kompozitin inorganik ve organik fazları arasında bir bağ oluşturmak için silan bağlayıcı ajanı ile doldurucuları yüzey işlemine tabi tutar. Bağlayıcı ajan, doldurucuyu rezin matrisine güçlü bir şekilde bağlar, böylece su emilimini en aza indiren hidrofobik bir ortam sağlayanın yanı sıra mekanik olarak zayıf matristen daha güçlü doldurucuya gerilimleri aktararak rezin kompozitin mekanik özelliklerini geliştirir.(31)

RBC'lerin genel avantajları arasında mükemmel estetik, uzun dönem başarılı klinik performans, tamir edilebilirlik, diş dokusuna mikromekanik bağlanabilmelerinden dolayı preparasyon esnasında diş dokusunun korunması ve görece ekonomik olmaları sayılabilir. (32) Avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlara uygulama esnasında teknik hassasiyet gerektirmesi, uygulama süresinin amalgam ve diğer restoratif materyallere kıyasla daha uzun olması, daha düşük kırılma dayanıklılığından dolayı okluzal stres alanlarında kullanılamaması örnek verilebilir. Ayrıca marjinal renklenme, tüberkül kırıkları, mikrosızıntı, ikincil çürükler, postoperatif hassasiyet veya ağrı gibi klinik problemler modern RBC restorasyonların dezavantajları arasında sayılabilir.(33, 34) Bunlar sıklıkla polimerizasyon büzölme stresi ile bağlantılıdır. Bununla birlikte, polimerizasyon büzölmesi sebebiyle iç gerilimler oluşur ve bu gerilimler mikroboşluklara, rezin kompozit katmanların kontaminasyonuna, katmanlar ve diş-restorasyon arasındaki

bağların kopmasına yol açabilir.(35) Ayrıca, restorasyondaki mikroboşlukların varlığı, marjinal sızıntıya yol açarak renklenmelere neden olabilir. Mikroboşlukların etrafındaki stres konsantrasyonuna bağlı olarak aşınma ve mikroçatlaklar meydana gelebilir.(36) Bu iddialar günümüzde geniş çapta kabul edilse bile, bu olumsuz sonuçlar ile polimerizasyon büzülme stresi arasındaki ilişkiyi destekleyen sınırlı klinik kanıt mevcuttur. Bununla birlikte, düşük polimerizasyon büzülmesinin bir sonucu olarak iç stresi azaltacak yeni malzemelerin, büzülmenin klinik etkisinin tam olarak anlaşılmasından önce bile gelecekte piyasaya hakim olacağı tahmin edilmektedir.(37)

2.2 Rezin Kompozitlerde Polimerizasyon Büzülmesi

2.2.1 Polimerizasyon Kinetiği

Her yıl global olarak 260 milyondan fazla direkt RBC restorasyon yapılmaktadır. Tatmin edici estetik kalitesi, indirekt restorasyonlara göre diş yapısının korunması, tamir edilebilirliği ve uygun maliyeti nedeniyle direkt anterior ve posterior restorasyonlarda ilk tercih olmuştur. Ancak, başlıca dezavantajları yapısal olarak gerçekleşen polimerizasyon büzülmesidir.(31) Kavite duvarlarına bağlandıklarında, serbest büzülme ile sınırlandırılırlar ve bu da kaçınılmaz olarak kavite duvarlarında olası ayrılma ve boşluk oluşumu ile büzülme streslerine yol açar.

Serbest monomer molekülleri, zayıf van der Waals kuvveti ile gevşek bir şekilde bağlıdır. Polimerizasyon sonrası, monomerler, moleküller arasında mesafenin azalması ile polimerde kovalent bağlarla sıkıca bağlanır ve polimerizasyon büzülmesi oluşur. Polimerizasyon büzülmesi zamana bağlıdır ve iki aşamada ilerler: Jelleşme öncesi ve Jelleşme sonrası veya katı büzülme.(38) Polimerizasyon sırasında iki makroskopik sınır oluşur: Bunlar başlangıç jelinin oluştuğu jel noktası dönüşümü ve modülde bir artışla birlikte polimerin camsı hale geldiği dönüşümü temsil eden vitrifikasyon noktasıdır. Bu polimer ağları, başlama bölgelerinin yakınında ortaya çıkan mikrojellerden büyüyen son derece heterojen bir yapıdır.(25) İlk faz sırasında plastik akış meydana gelir ve malzeme içindeki iç gerilimler gerilim-gevşemesine maruz kalırken, gerilim gelişimi jel noktasının ötesinde meydana gelir ve büyüklüğü elastik modülüne bağlıdır. Monomerler, polimere dönüşümün sonrasına kıyasla daha fazla hacim kaplar. Polimerizasyon sırasında, zayıf van der Waals kuvvetleri kovalent bağlara dönüştürüldüğünde monomer zincirleri arasındaki mesafe

azalır.(39) Dönüşüm sırasında rezin malzemesinin viskozitesinde kademeli bir artış da meydana gelir, bu da akışkanlığın (jel noktası) ve akma kabiliyetinin (vitritfikasyon) kaybına neden olur (40). Vitritfikasyondan önce, bu malzemeler akabilir ve gerilimleri kısmen hafifletebilir. Polimerize edici materyal akma kabiliyetini kaybettikten sonra elastik özellikleri artar ve sonuç olarak polimerizasyon büzülmesi üzerindeki herhangi bir limitasyon (örneğin restorasyon ve diş yapısı arasındaki bağ ile) artık büzülme stresleri üretecektir.

2.2.2 Polimerizasyon büzülmesi ve büzülme stresi

RBC'lerin restoratif materyal olarak kullanılmasından bu yana polimerizasyon ve bunun çekme, stres gibi etkileri alanında birçok araştırma yapılmıştır. RBC'ler, sertleştikten sonra %2-6 oranında hacimsel büzülmeye maruz kalırlar, bu da rezin kompozit ile diş arasında 5-15 MPa aralığında büzülme stresi oluşturur, ara yüzey bağını zorlar, ayrılmaya, mikroboşluklara ve kaspal sapmaya yol açar. (31)

Hacimsel büzülme ne kadar büyük olursa, karşılaştırılabilir bir elastik modül için büzülme gerilimi o kadar büyük olur. Büzülme geriliminin gelişimi, hacimsel büzülme gerilmesine ve büzülme anında rezin kompozitin sertliğine bağlıdır; düşük büzülme gösteren RBC'ler bile yüksek elastik modüle sahip olduklarında yüksek stres sergileyebilir. RBC'nin 2 mm'lik tabakalar halinde uygulanması ve her bir tabakanın bağımsız olarak polimerleştirilmesi, genellikle tam bir kür derinliği sağlamak ve polimerizasyon büzülmesinin net etkisini azaltmak için tavsiye edilir. Net büzülme geriliminin daha az olduğu varsayılır, çünkü ardışık eklemelerden önce daha küçük bir kompozit hacminin büzülmesine izin verilir.(31) Öte yandan Versluis ve ark. iyi bir bonding uygulaması ile beraber tabakalı uygulamanın, restore edilmiş dişin deformasyonunu ve dolayısıyla diş restorasyon kompleksi içindeki stres seviyesini arttırdığını göstermiştir.(41)

Yapılan çalışmalarda adeziv uygulanmış bir RBC restorasyonda stres gelişiminin restorasyon geometrisine bağlı olduğu gösterilmiştir, çünkü bağlı yüzeyin oranı belirli bir sınırı aştığında malzemenin ön jelleşme akışı engellenir. Gerilmenin büyüklüğü, bağlanmış alanların bağlanmamış alanlara oranı olan C faktörü (konfigürasyon faktörü) aracılığıyla tahmin edilebilir. C faktörü ne kadar yüksek olursa, stres seviyesi o kadar yüksek olur. Bu gözlem, büzülmenin hem büyüklüğü hem de yönü olan bir vektör olarak tanımlanmasıyla ilgilidir.(42) Bazı çalışmalar, C

faktörünün uygulanan RBC'nin hacmini hesaba katmadığı noktasına vurgu yapmaktadır. Braga ve ark. daha büyük boyutlu restorasyonlarda büzülme stresi ile mikrosızıntı arasında bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir.(43) Büzülme stresinin bir sonucu olarak bağların kopması, restorasyon/diş arayüzü boyunca veya restorasyon kenarlarında iç ve marjinal boşluklar, restoratif materyal ve diş yapısından birinin veya her ikisinin mikro-çatlama, marjinal renklenme, kaspal hareket gibi sonuçlara neden olabilir.(40)

2.2.3 Polimerizasyon Büzülmesini Azaltmak için Uygulanan Teknikler

Işık aktivasyon protokolünü değiştirme

Soft-start ve pulse-delay gibi ışık aktivasyon protokollerinin değiştirilmesi, RBC'nin uygun dönüşüm derecesini korurken büzülme stresini azaltan bir yaklaşım olarak savunulmaktadır.(42) Bunun mantığı, polimerizasyonun düşük yoğunlukta (genellikle 100mw/cm² civarında) başlatılmasıdır, daha yavaş bir polimerizasyon ile azaltılmış miktarda serbest radikal üretilir, bu da rezin kompozitin vitrifikasyon noktasını geciktirir.(44) Polimer vitrifikasyonu, viskozite yüksek bir değere ulaştığında meydana gelir ve malzemenin büzülme tarafından oluşturulan stresleri giderme kabiliyetini azaltır. Bu nedenle, ışık aktivasyonunu modüle etmek için kullanılan teknikler, rezin kompozitin vitrifikasyonunun geciktirilmesinin, rezin kompozitin akabileceği süreyi uzatarak büzülme stresinin azalmasına izin verdiği kavramına dayanmaktadır.

Soft-start kürlemede, ışık aktivasyonu, yaklaşık 10 saniye boyunca düşük bir ışıma ile başlar, ardından polimerizasyon işlemi kalan ışık aktivasyonu periyodu için artan ışıma ile devam eder. (44, 45) Diğer bir teknik olan pulse delay protokolü, genellikle yalnızca son tabaka için tavsiye edilir ve daha kısa süreli (3 veya 5 saniye gibi) düşük bir ışıma ile ışık aktivasyonunu takiben son sertleştirmeden önce uzun bir bekleme süresinden (yaklaşık 5 dakika) oluşur. Bu gecikme periyodu, daha yüksek ışıma ile son ışıkla sertleştirmeden önce gerilim gidermenin gerçekleşmesine izin verir. Çeşitli laboratuvar çalışmaları, rezin kompozitlerin mekanik özelliklerinden ödün vermeden ışık aktivasyonunu değiştirerek bu protokolleri kullanan restorasyonların marjinal bütünlüğünde iyileşme olduğunu göstermiştir.(44, 45) Bu konseptte dayalı olarak, birçok ışık cihazı, pulsatil, ramp veya soft-start modlarında ışık yaymak için alternatif seçenekler sunmaktadır.

Öte yandan, bu değiştirilmiş ışık aktivasyon protokollerinin sınırlamaları olabilir. Düşük ışıyım kullanmak, polimerizasyon reaksiyonu sırasında birkaç zincir büyüme merkezi oluşturur ve daha doğrusal polimerik zincirlerle sonuçlanır; bunlar bozulmaya daha yatkındır.(46) Ayrıca, daha yavaş polimerizasyon reaksiyonu, yüksek ışıyım altında elde edilenlerden daha düşük elastik modüllü polimerler üretebilir. Bu düşük elastik modül, büzülme stresinde bir azalmaya katkıda bulunabilir, ancak daha düşük mukavemet özelliklerine neden olarak, yükleme altında kırılma riskini artırabilir.(47)

Yapılan bir çalışmada, ışık aktivasyonunu soft-start, pulse delay ve continuous modlarda karşılaştırmak için, büzülme kuvveti gelişimi ve dönüşümünün aynı numune içinde gerçek zamanlı ölçümüne izin veren bir deneysel düzeneği kullanılmıştır.(48) Soft start ve pulse-delay modlarındaki büzülme kuvvetlerindeki azalmanın, RBC'nin düşük dönüşümünden önemli bir şekilde etkilendiğini, ayrıca, toplam büzülme kuvvetinin %70'inden fazlasının, rezin kompozit dönüşümünün son %15'ine ulaştıktan sonra oluştuğu bildirilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda continuous irradiance ile dönüşümün, diğer modlara göre daha düşük büzülme kuvvetleri ile sonuçlandığını ve gerilmede önemli bir azalmanın ancak vitrifikasyon noktasını geciktirerek elde edilebileceğini öne sürülmüştür. Bu nedenle literatürde, uygulama protokollerinin faydaları hakkında bir fikir birliği yoktur ve bu tür protokollerin klinik koşullar altında önemli faydalar sağlayıp sağlamadığını gösteren çok az klinik veri mevcuttur. 7 yıllık takiple yapılan randomize prospektif klinik çalışmada, soft-start veya pulse delay protokolü ile kürlen RBC restorasyonların başarısızlık oranları sırasıyla %27,9 ve %24,4 iken, continuous irradiance modu için %17'lik başarısızlık oranı bildirilmiştir.(49)

Gerilim Emici Ara Katman Uygulanması

Hacimsel büzülmenin yanı sıra, büzülme stresi aynı zamanda bir malzemenin elastik modülüyle de ilişkilidir, çünkü daha az rijit bir malzeme (düşük modül) artan gerinim kapasitesine sahiptir. Bu varsayıma dayalı olarak, RBC'nin altında ara katman olarak düşük elastik modüllü bir malzeme kullanılması, 'elastik kavite duvarı' olarak adlandırılan bir kavramda büzülme stresini azaltmak için savunulmaktadır. Birkaç çalışma, daha kalın adeziv katmanların, cam iyonomerlerin veya akışkan rezin

kompozitlerin stres emici bir katman olarak kullanımını değerlendirmiştir. Akışkan rezin kompozitlerin doldurucu oranları kondanse edilebilen RBC'lerden %20-25 daha azdır, bu sayede elastik modülleri rezinle modifiye edilmiş cam iyonomerlerinkine yakın olacak şekilde azalmıştır.(50) Klinik kanıtlar sınırlı olsa da, deneysel çalışmalar, RBC restorasyonların altında ara katman olarak daha kalın adeziv tabaka, cam iyonomer veya akışkan rezin kompozitler kullanarak marjinal sızıntıda önemli bir azalma veya gelişmiş marjinal bütünlük olduğunu göstermiştir. (40)

Kompozit yerleştirme tekniği

Klinisyenler geleneksel rezin kompozitleri uygularken, uygun polimerizasyonla birlikte büzülme streslerini azalttığı varsayıldığından rezin kompoziti tabakalı olarak yerleştirmektedir.(51) Popüler bir yaklaşımda ise, karşıt duvarlara yapışmayı önlemek için kavite, oblik katmanlarla restore edilmektedir. Bu tekniğin, alüminyum bloklarla gerçekleştirilen testlerde, tek bir katmana kıyasla daha az kaspal bükülme ile sonuçlandığı belirtilmiştir.(52) Oblik tabakalama kavramı, bağlanmış ve bağlanmamış restorasyon yüzeylerinin oranının (C-faktörü) olduğu bir teoriye dayanmaktadır ve bu büzülme stresini etkiler. Bu teoriye göre, C faktörünü azaltmak ve tek seferde bir tüberkül sapması üretmek, büzülme stresini hafifletecektir.(52) Bununla birlikte, C faktörü kavramı büzülme streslerini analiz etmek için tek başına yetersizdir. İlk tabakalar karşı duvarlara bağlanmadan yerleştirilebilse de, kaspal bükülme önlenemez.

Bununla birlikte, bu tekniğin bazı dezavantajları da araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır. Her bir tabaka, kavitenin içe doğru deformasyonuna neden olduğundan, bir kaviteyi doldurmak için kullanılan tabakaların sayısının artması, daha yüksek kümülatif kaspal deformasyona ve dolayısıyla strese neden olabilir.(53) Ayrıca, kaviteyi doldurmak için daha fazla RBC katmanı gerekir ve sonunda rezin kompozit tüm duvarlara yapışır. Bu nedenle, diş yapısında ve bağlı arayüzler boyunca önemli büzülme stresi beklenir. Aslında, rezin kompozitin eğik tabakalar halinde yerleştirilmesi, tek bir tabaka dolum (bulk doldurma) ile elde edilenden bile daha yüksek streslere neden olabilir. (53) Büzülme stresinden bağımsız olarak, geleneksel rezin kompozitler tek tabaka halinde uygulandığında yeterli sertleşme derinliğini elde etmek zordur. Resin kompozitin dönüşümünün azaltılması, daha düşük hacimsel büzülme nedeniyle stresin azalmasına neden olabilir, ancak bu

durum mekanik özellikler pahasına gerçekleşir. Tabakalama tekniği ile dolunun, bulk yani tek tabaka ile dolumdan daha fazla zaman aldığı ve teknik hassasiyet gerektirdiği bilinmektedir.(54) Ayrıca, çalışma alanının kontaminasyonu ve katmanlar arası hava boşluğu oluşma ihtimali de artar.(55) Çoğu klinisyen, diş hekimliğinde daha kalın tabakalarla kaviteyi doldurmayı ve hasta başında geçen süreyi azaltan, kullanımı kolay restoratif materyallerle çalışmayı tercih ettiğinden, klinik uygulamada operatif prosedürlerin basitleştirilmesi arzu edilmektedir.

Bulk-Fill Rezin Kompozitlerin Kullanılması

Bulk-fill RBC'lerin büzülme streslerini azalttığı iddia edilmektedir. Aslında, piyasada bulunan çoğu bulk-fill RBC, monomerik bileşimde önemli bir değişiklik göstermemektedir. Organik matriste modifikasyonlara sahip olan bulk-fill RBC'lerde; düşük büzülme, daha yüksek moleküler ağırlıklı monomerlerin veya stres giderici maddelerinin eklenmesi özelliği bulunur (56). Bulk-fill RBC'lerin jel sonrası büzülmeyi azalttığı ve bulk-fill RBC'lerle yapılan restorasyonların, geleneksel RBC restorasyonlara kıyasla kaspal deformasyonu ve büzülme stresini azalttığı ve kırılma direncinin arttığı gösterilmiştir. (51)

Klinik uygulamalara bakıldığında, bu materyaller daha yeni piyasaya sürüldüğü için, bulk-fill RBC'lerle yapılan restorasyonları değerlendiren az sayıda çalışma mevcuttur. Bununla birlikte, bazı çalışmalar 3 ve 5 yıl sonraki kontrollerde yeterli klinik başarı tespit etmiştir.(57, 58) Bulk-fill RBC'leri üretirken, üreticiler tarafından benimsenen stratejilerdeki farklılıkların, bu malzemelerin polimerizasyon derinliği ve büzülme stresi oluşumu ile ilgili davranışlarını etkilediğini ve bu nedenle gözlemlenen sonuçların, bulk-fill rezin kompozit olarak sınıflandırılan bu materyaller için tahmin edilemeyeceğini vurgulamak önemlidir.(56)

2.3 Bulk-Fill Rezin Kompozitler

Rezin bazlı kompozit materyaller (RBC), posterior dişlerin restorasyonu için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Estetik, diş renginde restorasyonlara yönelik artan talep ve hastanın cıva içeren restorasyonların kullanımına ilişkin endişeleri, RBC'lerin kullanımında artışa neden olmuştur. 2013 yılındaki Minamata Konvansiyonu dental amalgamın aşamalı olarak kaldırılmasını talep ederken, diş hekimliği okullarında posterior dişlerde RBC uygulama tekniklerinin giderek daha fazla öğretilmesiyle, diş hekimlerinin posterior dişlerin restorasyonu için RBC'ye olan güveni artmaktadır.

(59) Geleneksel rezin kompozitler yerleştirilirken uygulanan tabakalama tekniği zaman alıcıdır, çünkü bütün tabakaların yerleştirilmesi ve ayrı ayrı ışıkla sertleştirilmesi gerekir. Basit yaklaşımlar klinisyenler tarafından yalnızca zamandan tasarruf etmek için değil, aynı zamanda hata olasılığını azaltmak için de tercih edilmektedir. Son zamanlarda, kürelemeden ödün vermeden ve geleneksel tabakalama tekniği ile yerleştirilmiş rezin kompozitlerde gözlemlenenlere benzer büzülme stresleri üretirken, 4-5 mm'lik kalınlıktaki tabakalar halinde yerleştirilebildiği iddia edilen bulk-fill rezin kompozitler (BRBC) tanıtılmıştır. Bu daha kalın bulk-fill RBC tabakalarının yerleştirilmesi, posterior restorasyonları yerleştirirken gereken süreyi ve teknik hassasiyeti azaltabilir.

Bulk-fill RBC'lerin de kendi aralarında, daha derin polimerizasyon ve azaltılmış stres elde etmek için kullanılan mekanizmalar farklıdır. Bazı üreticiler, bis-(4-metoksibenzoil)dietil-germane (Ivocerin) gibi ek veya daha verimli fotobaşlatıcılar kullanarak daha derin polimerizasyon elde etmeye çalışmışlardır.(60) Bazı üreticiler de, rezin kompozit boyunca ışık iletimini artırmaya odaklanırlar. Organik matris ve doldurucular arasındaki pigmentlerin varlığı ve kırılma indeksi uyumsuzluğu, ışık iletiminde azalmaya neden olan ana faktörlerdir.(61) Benzer kırılma indisine sahip doldurucular ve monomerlerin kullanılmasının yanı sıra, doldurucu içeriğini azaltmak, ışık iletimini artırmak ve daha derinlerde polimerizasyona olanak sağlamak için savunulan bir yaklaşımdır. (62)

2.3.1. Bulk-Fill Resin Kompozitlerde Kür Derinliği

Polimerize edilmemiş RBC'nin yeterli dönüşümünü sağlamak için 2 mm'lik tabakalar halinde yerleştirilmesi gerektiği kabul edilmektedir. RBC'de elde edilen gerçek kür derinliği, gölge ve yarı saydamlığa göre değişebilir; daha opak olan koyu tonlar, daha da yarı saydam rezin kompozitlere kıyasla daha sık kür derinliğine sahiptir. Bazıları dual-cure olmasına rağmen, piyasadaki bulk-fill RBC'lerin çoğu tamamen ışıkla sertleşir. Üreticiler, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle kür derinliğini artırmaya çalışmışlardır:

- 1-) Doldurucu içeriğinin azaltılması,
- 2-) Doldurucu partikül boyutunun artırılması (63)
- 3-) Ek foto başlatıcıların kullanımı

Doldurucu içeriğinin azaltılması ve RBC içerisindeki doldurucu boyutunun artırılması, ışığın saçılma miktarını azaltır ve başlatıcıyı etkinleştirebilecek emilen ışık miktarını artırır. Örneğin Tetric EvoCeram Bulk-fill, birkaç farklı fotobaşlatıcı kullanarak kür derinliğini artırır.(59) Üreticiler, kamforkinon veya lucirin gibi standart başlatıcılarla karşılaştırıldığında, daha kalın tabakalar halinde polimerize edilmesini sağlayan Ivocerin adlı oldukça reaktif bir fotobaşlatıcının eklenmiş olduğunu iddia etmektedir.(59) Bununla birlikte bu gibi değişikliklere rağmen, ışıkla sertleşen bulk-fill RBC'lerin çoğu hala 4-5 mm'lik tabakalar halinde kullanılmakla sınırlıdır.

Bazı üreticilerin ışıkla sertleştirme iddialarının yüksek yoğunluklu LED ışıkla sertleştirme ünitelerine dayandığını belirtmek önemlidir. Dikkate alınması gereken bir diğer faktör, ışık ucundan uzaklık arttığında yoğunluktaki düşüştür. Bir çalışmada, ışık cihazının ucundan RBC restorasyon yüzeyine olan mesafeyi artırmanın, her 1 mm'de ışık yoğunluğunu %10 azalttığı belirtilmektedir.(64) 2 mm rezin kompozit kürlendiğinde, ışık yoğunluğunun ilk yoğunluğun %6'sına düşebileceği bulunmuştur. (65) Bu nedenle, yazarlar 4 mm veya daha kalın katmanlar sertleştirilirken dikkatli olunmasını tavsiye eder. Doğrudan erişim, ışık ucunun kavite tabanından uzaklığı ve ışık gücü, her bir vaka için uygun sertleştirme sürelerine karar verirken dikkate alınmalıdır. Ek olarak, genel pratikte ışık cihazlarının etkinliğinin, cihazların neredeyse %50'sinin minimum ışınlama seviyelerine (300 mW/cm²) ulaşmaması nedeniyle yetersiz olduğu bulunmuştur (66). Bu nedenle, cihazların düzenli olarak bakımının yapılması ve güç çıktıları açısından değerlendirilmesi önerilir.

Üreticilerin ışıkla sertleşme süreleri hakkında farklı kanıtları mevcuttur. Bazı çalışmalar, daha uzun sertleşme sürelerinin gerekli olması nedeniyle, bulk-fill RBC için önerilen ışıkla sertleşme sürelerinin savunulamayacağını öne sürmüştür.(67) Bir in vitro çalışmada, mevcut bulk-fill rezin kompozitlerin bazılarının, üretici tarafından iddia edilenlerden önemli ölçüde daha düşük sertleşme derinliğine sahip olduğu belirtilmiştir.(68) Bununla birlikte en son çalışmalar, üreticinin, optimal kürlenme koşulları sağlandığı müddetçe bulk-fill RBC'nin artan derinliklerde yeterli sertliğe ulaşabileceği yönündeki iddialarını desteklemektedir.(69) Kürlenmesi gereken derinlik fazla ise, sertleşmemiş rezin tabanda kalabilir ve bu da işlem sonrası hassasiyete, marjinal sızıntıya, çürüklere ve restorasyonun mekanik başarısızlığına

neden olabilir. Dual cure RBC'lerin ortaya çıkışı, restorasyonların istenen özelliklerini korurken kür derinliği konusundaki endişeleri ortadan kaldırdığı için heyecan verici bir yeniliktir.

2.3.2. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerde Polimerizasyon Büzülmesi

Kürlemede meydana gelen polimerizasyon büzülmesinin etkisini azaltmak için tamamen ışıkla sertleşen geleneksel RBC'lerin tabakalı yerleştirilmesi önerilir. Polimerize edilmemiş RBC, kavitenin birden fazla duvarına temas ettiğinde C faktörünü artırır.(42) Bu büzülme stresi, diş ile restoratif materyal arasındaki en zayıf arayüzde bağ kopmasına neden olabilir. Bu da ikincil çürük, marjinal renklenme, kırık ve işlem sonrası hassasiyet gibi bir dizi potansiyel soruna neden olabilir. Bulk-fill RBC üreticileri, daha fazla kalınlıkta yerleştirilebilmeleri ile birlikte geleneksel RBC'lerden daha düşük polimerizasyon stresleri oluştuğunu iddia etmektedir.

Genel olarak, bulk-fill RBC'lerin RBC'lere benzer hacimsel büzülmeye sahip olduğu gösterilmiştir, bu da bu malzemeleri kullanmanın genel bir faydası olmadığını düşündürülebilir.(68) Bununla birlikte, spesifik olarak büzülme stresine bakıldığında, in vitro çalışmalar, bulk-fill RBC'lerin RBC'lerden daha az büzülme stresi sergilediğini göstermiştir.(70) Bu, bulk-fill RBC küçülürken, bunun mutlaka marjinal bütünlüğe zarar vermediğini gösterir. Üreticiler, daha düşük elastik modülüne sahip büzülme stresi gidericilerin dahil edilmesini içermekle birlikte, büzülme stresi etkisini çeşitli şekillerde değiştirmeye çalışmışlardır. (71) Örneğin SDR (Caulk Dentsply, York, PA, ABD, daha yavaş bir elastisite modülü gelişimi ile sonuçlanan, kamforkinon foto başlatıcı ile etkileşime giren bir polimerizasyon modülatörü içermektedir.(59)

2.3.3. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerde Marjinal Boşluk Oluşumu

Marjinal boşluk oluşumuna ve adaptasyona bakıldığında, çalışmalarda kesin sonuçlara varılamamıştır. Bazıları, geleneksel rezin kompozite kıyasla bir dizi bulk-fill rezin kompozit arasında istatistiksel bir fark göstermezken, bazı araştırmacılar, geleneksel tabakalama ile karşılaştırıldığında bulk-fill rezin kompozitler uygulandığında marjinal sızdırmazlıkta gelişim olduğunu öne sürmektedir. Bir çalışmada, daha yüksek viskoziteli bulk-fill RBC'lerin daha büyük marjinal boşluk oluşumuna neden olduğunu bulmuştur.(72) Yüksek viskoziteli rezin kompozitlerle

bu sorunun üstesinden gelmenin bir yöntemi, bunları yerleştirmeden önce ısıtmak veya kavitenin tabanını kapatmak için düşük viskoziteli bir rezin kompozit kullanmaktır. Dual cure bulk-fill RBC'ler de sertleşme sonrası kabul edilebilir marjinal adaptasyon göstermiştir.(73) Beklendiği gibi, artan kavite derinliği ile boşluksuz ara yüzlerin daha zor oluşturulduğu rapor edilmiştir. Ancak, aynı kavite derinliği uygulanarak geleneksel RBC ile bulk-fill RBC karşılaştırıldığında hiçbir fark bulunmamıştır.(74) Bu, şunu düşündürür: arayüzey boşluk oluşumu açısından rezin kompozit malzemesinin türünden daha önemli olan faktör kavite derinliğidir. Genel olarak, kanıtlar bu yeni materyallerin marjinal adaptasyonu için güven vericidir.

2.3.4. Bulk-Fill Resin Kompozitlerin Fiziksel ve Estetik Özellikleri

Geleneksel RBC'lerin geliştirilmesinde üreticiler, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için ürünlerinin doldurucu içeriğini sürekli olarak artırmaya çalışmışlardır. Bununla birlikte, kür derinliğini artırmak için daha düşük doldurucu içeriğine sahip olma eğiliminde olan birçok bulk-fill RBC'de durum böyle değildir. Dual-cure bulk-fill RBC'de dahil olmak üzere bulk-fill RBC'leri karşılaştıran yakın tarihli bir çalışmada, geleneksel RBC'lere kıyasla restorasyonun dayanıklılığı ile ilgili bazı endişeleri vurgulanmıştır.(75) Akışkan bulk-fill RBC'lerin, geleneksel akışkan RBC'lere kıyasla nispeten düşük kırılma direncine ve aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur.(76) Bu nedenle üreticiler, akışkan bulk-fill RBC'lerin geleneksel rezin kompozit ile kapatılmasını tavsiye eder. Bu durum, kapaklama katmanına ihtiyaç duymayan ve kavitenin derinliğine bağlı olarak tek tabaka halinde yerleştirilebilen malzemelere kıyasla artan yerleştirme hızının potansiyel avantajını azaltır. (69) Buna ek olarak, yazarlar, açık bir temas noktası ile sonuçlanabilecek bitişik dişe karşı aşınma riski nedeniyle, akışkan bulk-fill RBC'ler kullanıldığında, proksimal temas noktalarının yanı sıra oklüzal yüzeylerin de geleneksel RBC ile kapatılması gerektiğini belirtmektedir.

İlginç bir şekilde dual-cure bulk-fill RBC de düşük doldurucu içeriğine (%65 Ağırlık) sahiptir (59), ancak üreticiler bu malzemenin geleneksel RBC ile kapatılmadan kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Bulk-fill RBC ile ilgili in vitro araştırma sınırlıyken, klinik in vivo araştırma birkaç deneme ve vaka raporu dışında azdır. Daha kaliteli verilere ihtiyaç duyulmasına

rağmen, bulk-fill RBC'lerin amalgam veya geleneksel RBC'ye bir alternatif olduğunu gösteren bazı klinik kanıtlar bulunmaktadır.(58) Geleneksel tabakalama tekniği ile karşılaştırıldığında, bulk-fill RBC kullanan yakın tarihli randomize klinik çalışma, beş yıl sonunda karşılaştırılabilir bir başarı bulmuştur.(58) Başka bir çalışma, pulpatomi geçirmiş süt dişlerinin restorasyonunda bulk-fill RBC'lerin paslanmaz çelik kronlar kadar başarılı olduğunu göstermiştir. (77)

Ancak gerçek şu ki, şu anda bulk-fill RBC'lerin kullanımlarını destekleyecek az sayıda klinik araştırma mevcuttur. Klinisyenler, bir materyalin potansiyel avantajlarını ve dezavantajlarını belirli klinik senaryoya göre değerlendirmelidir. Estetik, amalgama kıyasla tüm rezin kompozit malzemeleriyle iyileştirilir, ancak bulk-fill RBC'ler, geleneksel RBC'lere kıyasla malzemelerin gölgesi ve yarı saydamlığı açısından yetersiz kalabilir. Nihai estetiğin önemli bir faktör olduğu hastalar için, geleneksel rezin kompozitlerle kapatma katmanı endikedir ve birçoğu bulk fill rezin kompozitlerle uyumludur.

2.4. Bulk-Fill Rezin Kompozitlerin Sınıflandırılması

2.4.1 Kondanse Edilebilen Geleneksel Bulk-Fill Rezin Kompozitler

Bulk-fill RBC'ler, geleneksel RBC'lerden (maksimum 2 mm) daha kalın tabakalar halinde (4 mm ve üzeri) yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Kondanse edilebilen BRBC'lere Filtek Bulk-Fill (3M Espe, St.Paul, MN, ABD), Tetric EvoCeram Bulk-Fill (Ivoclar/Vivadent AG, Schaan, Lihtenştayn), X-tra fill (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), Reveal HD Bulk (Bisco, ABD), QuiXfil, Quixx Posterior (Caulk Dentsply, York, PA, ABD) örnek verilebilir.(59, 78)

2.4.2 Akışkan Bulk-Fill Rezin Kompozitler

Düşük viskoziteli, ışıkla sertleşen akışkan bulk-fill RBC'ler, yetersiz aşınma direnci ve sertlik özelliklerinden dolayı her zaman geleneksel RBC ile kapatılmaya ihtiyaç duyarlar.(75) Kaide olarak kullanılan bu akışkan bulk fill RBC'lere GrandioSO Heavy Flow (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), SDR (Caulk Dentsply, York, PA, USA), Filtek Bulk-Fill Flowable (3M Espe, St.Paul, MN, ABD), Venus Bulk-Fill (Kulzer, Hanau, Almanya), Tetric EvoFlow Bulk-Fill (Ivoclar/Vivadent AG, Schaan, Lihtenştayn), X-tra base (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), Parkell LC Base Bulk Fill (Parkell, ABD) örnek olarak gösterilebilir.(78-81)

2.4.3. Sonik Aktive edilen Bulk-Fill Rezin Kompozitler

Kerr (Orange, CA, ABD), sonik titreşim kullanımıyla düşük viskozite özelliği kazanan (malzemenin boşluğa akmasına izin veren), yüksek viskoziteli bulk-fill RBC Sonic Fill 2'yi üretmiştir. Üreticiler bu bulk-fill RBC'nin, yerleştirme sırasında malzemenin viskozitesini azaltmak amacıyla, özel olarak tasarlanmış bir el aleti tarafından üretilen sonik enerjiyle etkinleştirilen , yüksek oranda doldurucu içeren bir bulk-fill RBC olduğunu iddia etmektedir.(59) Bu nedenle, şekillendirilebilen daha viskoz bir duruma dönmeden önce akışkan bir rezin kompozit gibi kaviteye uygulanabilir. Sonik titreşimlerden kaynaklanan akıcı özelliği, materyalin kavite duvarlarına adapte olmasını sağlar, ancak restorasyonda çıkıntıların oluşmasını önlemek için özen gösterilmelidir. Bu çıkıntılar, oklüzal düzenlemelerle birlikte kolayca düzleştirilebilir ve parlatılabilir.

2.4.4. Dual-cure Bulk-fill Rezin Kompozitler

Dual-cure bulk-fill RBC'ler de piyasaya sunulmuştur. Bunlar, restorasyon yüzeyinin cilalanabilmesi için ışıkla sertleştirmeye imkan sağlayarak hem kimyasal hem de ışıkla sertleştirme teknolojisini birleştirmeyi amaçlar, aynı zamanda restorasyonun tüm derinliği zaman içinde kimyasal olarak sertleşir. Fill-Up (Coltene Whaledent, Alstatten, İsviçre), BulkEZ (Danville Materials, Carlsbad, CA, ABD), HyperFIL (Parkell, New York, NY, ABD), Injectafil DC (Apex Dental Materials, WI, ABD) dual cure bulk-fill RBC'lere örnek gösterilebilir.(82) Fill-up'ın yüzeyi ışıkla sertleştirilebilir ve cilalanabilir. Bu arada restorasyonun tüm derinliği üç dakika içinde kimyasal olarak sertleşir ve tek tabaka halinde herhangi bir derinlikteki (10 mm+) kaviteye uygulanabilir. (59)

2.4.5. Ön Isıtmalı Bulk-fill Rezin Kompozitler

Yeni nesil bazı bulk-fill RBC'ler ise, adaptasyon öncesi ısıtılmak üzere tasarlanmıştır. Bu bulk-fill RBC'lerde, ısıtma yöntemi sayesinde materyal uygulama esnasında akışkan, sonrasında ise hemen modelajı yapılabilecek kıvamdadır. Calset Heater (AdDent Inc., Danbury, CT, ABD) ve ENA Heat (Micerium, Avegno, İtalya) gibi mevcut ön ısıtma cihazları, 37–68 °C çalışma sıcaklık aralığına sahiptir.(83) Önden ısıtmalı bulk-fill RBC olan Viscalor (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), Caps Warmer cihazıyla kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu cihazın 37–68 °C sıcaklık aralığını kapsayacak şekilde üç çalışma modu (T1, T2 ve T3) vardır.(84)

2.4.6. Ormocer Bazlı Bulk Fill Rezın Kompozıtlr

En güncel bulk-fill RBC'lerden biri de, saf seramik esaslı ormocer bazlı AdmiraFusion Extra (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya)'dır. Ormocer olarak adlandırılan modifiye edilmiş seramikler, yeni geliştirilmiş bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Polimerizasyon büzülmesinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için, ormocerler sadece organik değil, aynı zamanda inorganik bir ağıdan oluşur. Bu ağı, monomerlerin daha iyi yerleşimini sağlaması ve geleneksel rezin kompozıtlere kıyasla daha düşük bir monomer salınımına yol açması beklenmektedir.(85)

2.5. Hacımsel Polimerizasyon Büzülmesi Ölçüm Yöntemleri

RBC'lerin polimerizasyon büzülmesini ölçmek için çeşitli deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Çoğu metodoloji, hem jel öncesi hem de sonrası büzülmeyi içeren toplam büzülmeyi kaydeder. Buna karşılık, strain gauge tekniğı, büzülme stresi gelişimi ile daha doğrudan ilişkili olan jel sonrası büzülmeyi izole etmek için önerilmektedir. Deneysel olarak, polimerizasyon büzülmesi hacmi ve iç boşluklar mikro-CT ile incelenebilirken, polimerizasyon büzülmesinin uyguladığı kuvvetler yük hücreleri kullanılarak ölçülebilir. Bununla birlikte, büzülme geriliminin kendisi doğrudan ölçülemez çünkü bu bir malzeme özelliğı veya fiziksel tepki değil, yerel deformasyona ve malzeme özelliklerine bağılı olarak bir malzeme içindeki durumu ifade eden hesaplanmış bir mühendislik faktörüdür. Büzülme gerilimi ve gerilim dağılımı, sonlu elemanlar analiz tekniğı kullanılarak hesaplanabilir.(40)

2.5.1. Cıva Dilatometresi Yöntemi

RBC'lerin polimerizasyon büzülmesini değerlendirmeye yönelik ilk girişimler, polimerizasyon büzülmesinden kaynaklanan hacımsel kaybı ölçmekten ibaretti. Hacımsel büzülme, numuneyi çevreleyen bir hazneye bağılı bir sıvı sütununun doğrusal yükseklik değışiklikleri belirlenerek bir cıva dilatometresinde ölçülebilir. Kılcal boru bir termometre gibi okunur.(86, 87) Bu yöntemin dezavantajları, sıvı hacmini etkileyebilen rezin kompozit polimerizasyonu sırasında oluşan sıcaklık değışimlerinden kaynaklanan hata potansiyeli ve zaman alıcı numune hazırlama gerekliliğıdir, ayrıca akışkan rezin kompozitler ölçülemez. (88)

2.5.2. Su Dilatometresi Yöntemi

Işık kaynağına erişim ve cıvanın opaklığı, cıva dilatometresi kullanılırken ışıkla sertleşen dental materyallerde karşılaşılan zorluklardandır. Çevresel cıva kontaminasyonu ve toksik cıva buharları potansiyeli nedeniyle su dolu dilatometreler tercih edilir. Ancak başarılı bir uygulama için en kritik faktör, büzülme testi sırasında dilatometre için sabit bir sıcaklık ortamının sağlanmasıdır.(89) Ekzotermik polimerizasyon reaksiyonunun ısısına ek olarak ışık kaynağından gelen ısı, küreleme üzerine sıcaklıkta kaçınılmaz bir artışa katkıda bulunur.

Yamamoto ve arkadaşları akışkan RBC'lerin polimerizasyon büzülmesini su dolu bir dilatometrede ve benek kontrast ölçümü yöntemi ile ölçmüştür. Akışkan RBC cam tüpte yoğunlaştırılır, ısıtılır ve lazer benek alanı dijital bir çerçeveye kaydedilir.(90) Su dolu dilatometre, sadece akışkanların değil, diğer rezin kompozit türlerinin de büzülme ölçümü için endikedir .

2.5.3. Gaz Piknometresi Yöntemi

RBC'lerin polimerizasyon öncesi ve sonrası yoğunluk değişiminin ölçümü, polimerizasyon öncesi ve sonrası numunelerin hacmini belirleyen bir gaz piknometresi ile yapılabilir ve hacimdeki fark hesaplanır.(91)

2.5.4. Buoyancy Yöntemi

Buoyancy (sudaki yoğunluk) ölçümleri, damıtılmış suda numunenin kaldırma kuvveti değişimini ölçerek gerçek zamanlı olarak RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesini belirler.(92) Arşimet yöntemi, kaldırma kuvveti ilkesine göre hacimdeki gerçek küçülmeyi ölçer ve bu yöntem bir Alman Standardı (DIN 13907/2005) olarak geliştirilmiştir. Naum ve arkadaşları polimerizasyon sırasında rezin kompozitin kaldırma gücündeki değişiklikleri kaydederek elektromanyetik bir denge ile polimerizasyon büzülmesini nicelleştirmişlerdir. Bu yöntem küçük aralıklarla gerçek zamanlı hacimsel büzülmeyi ölçer.(93) Hacimsel büzülme, AcuVol (Bisco Inc., Schaumburg IL, ABD) kullanılarak video görüntüleme ve dijital kamera aracılığıyla numune görüntüsü şeklinde elde edilir.

Hacimsel büzülme, büzülmenin tüm yönlerde aynı şekilde gerçekleşmesi koşuluyla, doğrusal büzülmenin yaklaşık üç katına eşittir.(92, 94) İzotropik büzülme, tüm yönlerde eşit büzülmedir; bu, kavitenin sınırları ve ilgili sınır koşulları tarafından

sınırlandırıldığından, diş kavitesine uygulanan bir restoratif materyalde neredeyse hiç söz konusu değildir.

2.5.6. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (μ CT) Yöntemi

RBC'lerde karşılaşılan polimerizasyon büzülmesinin hacimsel ölçümü için kullanılan bir diğer güncel yaklaşım bilgisayarlı mikro-tomografi cihazlarının kullanarak yapılan ölçüm tekniğidir. Bu tekniğe detaylı olarak devam eden bölümlerde değinilmiştir.

2.6. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (μ CT)

1895 yılında Röntgen tarafından X-ışınlarının icadı, teşhis tıbbında devrime yol açarak vücudun iç işleyişini invaziv olmayan bir şekilde görmeyi mümkün kılmıştır. (95) X-ışını bilgisayarlı tomografi görüntüleme yöntemi ise 1970'lerin başında geliştirilmiştir. Çoklu açılardan toplanan görüntüler, materyallerin ya da doku içerisindeki materyal yoğunluğunun üç boyutlu (3D) uzaysal dağılım haritalarını üretmek için yeniden yapılandırılır.(96) Karşılaştırıldığında, geleneksel radyografi, X-ışını yolu boyunca malzeme yoğunluğunun azalmasının toplamını temsil eden iki boyutlu görüntüler sağlamakla sınırlıdır..

Bilgisayarlı tomografi (BT) tarayıcıları tipik olarak 1 mm³ hacimli elemanlardan (vokseller) oluşan görüntüler üretirken, 1980'lerin başında geliştirilen X-ışını bilgisayarlı mikro tomografi (mikro-CT veya μ CT) sistemleri çok daha iyi uzaysal çözünürlüğe sahiptir, 5-50 μ m aralığında vokseller üretmektedir ve BT voksellerinden hacim olarak yaklaşık 1.000.000 kat daha küçüktür.(97) Mikro-CT tarayıcılar ilk üretildiklerinde erişim zorlulukları taşımalarına rağmen günümüzde kompakt ticari sistemler artık daha yaygın kullanılmaktadır ve hızla birçok akademik ve endüstriyel araştırma laboratuvarının temel bileşeni haline gelmiştir. Diş, kemik gibi mineralize dokular ve seramik, polimer, biyomateryal yapı iskeleleri vb. gibi materyaller dahil olmak üzere çok çeşitli numuneler doğrudan mikro-CT kullanılarak incelenebilir. Mikro-CT sistemlerinin geliştirilmesiyle, bu tür sistemlerin en yeni nesli, küçük canlı hayvanların in vivo görüntülenmesine izin verir.(98)

Mikrofokal nokta X-ışını kaynakları ve yüksek çözünürlüklü dedektörler kullanan mikro-CT sistemi, numunelerin 3D yeniden yapılandırılmış görüntülerini üretmek için birden fazla görüntüleme yönü boyunca döndürülen projeksiyonlara sahiptir.

Görüntüler, X-ışını kaynağının enerjisi ve malzeme numunesinin atomik bileşimi tarafından belirlenen doğrusal zayıflama katsayılarının uzamsal dağılım haritalarını temsil eder. Görüntüleme işlemi tahribatsız olduğundan, aynı numunenin dahili özellikleri birçok kez incelenebilir, numuneler biyolojik ve mekanik testler için tarandıktan sonra kullanılabilir durumda kalır.

2.6.1. Micro-CT Aracılığı ile Diş Dokularının Ölçümü

Kullanılan tekniklerin güvenilirliği açısından, mikro-CT cihazlarının diş dokularının kesit alınarak incelenmesi söz konusu olduğunda mine yapısının kalınlığının ölçümü araştırmalarda rehber olarak kabul edilmiştir. BT ve mikro-CT'nin kıyaslanmasında, mine kalınlığının ölçümünde, bilgisayarlı tomografi görüntülerinin düşük çözünürlüğü ve abartılı etkisi, verileri büyük ölçüde hatalı oluşturmaya yol açarken, mikro-CT sistemlerinin kullanımı, mine kalınlığının ölçümü için etkili ve tahribatsız bir teknik olarak gösterilmiştir.(99)

Benzer şekilde mikro-CT ile ölçümlerinin doğruluğunun ortaya konulabilmesi için çeşitli primatlar ve primat olmayanların diş minesi kalınlığı, mikro-CT ile ve dişlerin fiziksel olarak kesilmesi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, değişen boyut ve kalınlıktaki dişlerin mikro-CT taramalarında net ve doğru bir şekilde tespit edildiği, fiziksel kesimdeki ve mikro-CT'deki neredeyse aynı düzlemlerden alınan ölçümlerin sadece %3 ila %5 arasında farklılık olduğu ortaya konmuştur. (99)

Mine kalınlığının yanı sıra micro-CT sistemleri mine, dentin ve pulpa odasının kalınlığını ve alanını, doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya çıkaran bitişik dilimler de oluşturabilir. Görüntüleme yazılımına ek olarak, mine ve dentin için hacimsel veri sağlayan 3 boyutlu rekonstrüksiyonlar da üretilebilir.(100)

2.6.2. Polimerizasyon Büzülmesi Kaynaklı Hacimsel Kaybın Micro-CT ile Değerlendirilmesi

Son zamanlarda yapılan birçok çalışmada, restoratif materyalleri, diş kavitesi dışında test ederek hacimsel polimerizasyon büzülmesinin değerlendirildiği yöntemler kullanmıştır.(68) Bilgisayarlı mikro tomografi (μ CT) analizi tekniği de polimerizasyon büzülmesini değerlendirmek için kullanılmış ve diş preparatları üzerindeki morfolojik değişiklikleri kalitatif ve kantitatif olarak karşılaştırmak için 2D-3D görüntülerin oluşmasına izin vermiştir. Mikro-CT, artifaktların ortadan

kaldırılması nedeniyle nesnel veriler sağlayan tahribatsız bir analitik yöntemi temsil eder. Örnekler hem nicel hem de nitel olarak incelenebilir; yani hacimler özel yazılımlarla hesaplanabilirken, belirli ayrıntılar görsel görüntü analizi ile lokalize edilebilir. Bu yöntemin, adeziv tek tip olduğunda rezin kompozitin büzülme konumlarını betimlediği, mikroboşluk oluşum bölgelerini ve potansiyel arayüz hata bölgelerini tespit edebildiği belirtilmektedir. (101)

Micro-CT ile adeziv restorasyonların dahili adaptasyonunun değerlendirilmesine ek olarak marjinal adaptasyon ve adeziv arayüzünün tahribatsız incelemeleri yapılır. (102) Hirata ve arkadaşları, düşük polimerizasyon büzülmesi gösteren bulk-fill rezin kompozitlerin hacimsel büzülmesini, bağlayıcı ajanların uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda mikro-CT aracılığıyla değerlendirmişlerdir.(101) Hacimsel değerlendirme, kürlenmemiş ve kürlenmiş durumdaki rezin kompozitin hacmini ölçer ve dahili boşlukları da gösterebilir. Mikroboşlukların tespitinin, taramanın çözünürlüğü ile ilgili olduğuna dikkat edilmelidir; bu, boşlukların 92.5 voksel boyutunda tespit edilebildiği anlamına gelir ve bu yöntemin sınırlamalarından bir tanesidir. Daha küçük boşluklar daha yüksek çözünürlüğe sahip sistemlerle görselleştirilebilir.

Sonuç olarak, rezin kompozitlerin doğaları gereği sergilediği polimerizasyon büzülmesi, hekimlerin en çok endişe duyduğu konulardan biridir. Literatürde, bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi özelliklerinin incelendiği çok az çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, en güncel altı farklı bulk fill rezin kompozitin, hacimsel polimerizasyon büzülmesi özellikleri farklı ışık modları uygulanarak bilgisayarlı mikro tomografi (μ CT) aracılığıyla incelenmiştir.

Çalışmada test edilen sıfır hipotezler şunlardır:

- 1- Farklı bulk fill rezin kompozitler, benzer hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oranları sergilemektedir
- 2- Uygulanan ışık gücü seviyesinin, hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oranına etkisi bulunmamaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada, altı farklı bulk-fill rezin kompozitin kaviteye adaptasyon ve hacimsel polimerizasyon büzülmesi davranışları mikro-CT ile değerlendirilmiştir. Bulk-fill RBC'lerin kaviteye adaptasyon sonrası kalan boşluk miktarları, polimerizasyon işlemi sonrasında oluşan büzülme miktarları ve polimerizasyonları sonrasında kavite ile rezin kompozit arasındaki mikroboşluk oranları hacimsel olarak hesaplanarak değerlendirilmiştir.

3.1. Dişlerin toplanması

Bu çalışmada, son üç ayda çekilmiş, herhangi bir restorasyon veya çürük içermeyen 60 adet insan büyük azı dişi Akdeniz Üniversitesi Klinik Araştırmala Etik Kurulu tarafından onaylanan 2012-KAEK-20 numaralı etik kurul onayı ile toplanarak kullanılmıştır. Dişlerin yüzeyindeki sert ve yumuşak doku kalıntıları çekimden hemen sonra periodontal küret ile uzaklaştırılmış ve dişler önce %0,5'lik timol solüsyonunda, daha sonra çalışmanın başlangıcına kadar distile suda bekletilmişlerdir.

3.2. Materyal Seçimi

Bu çalışmada, altı farklı bulk-fill RBC, SonicFill 2 (Kerr Dental, Brea, CA, ABD), VisCalor (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), AdmiraFusion Extra (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), Filtek Bulkfill (3M Espe, St.Paul, MN, ABD), Fill-Up (Coltene Whaledent, Alstatten, İsviçre) ve GrandioSO Heavy Flow (Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya) kullanılmış ve düşük ve yüksek ışık çıkış gücü modu olmak üzere farklı ışık çıkış gücü modlarında test edilmiştir. (Şekil 3.2.1) Çalışmada kullanılan restoratif materyallere ait üretici, içerik ve lot numaralarına ait bilgiler Tablo 3.2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.1: Çalışmada kullanılan bulk-fill RBC'ler; A): SonicFill 2, B) VisColor, C) AdmiraFusion Extra, D) Filtek Bulkfill, E) Fill-Up ve F) GrandioSO Heavy Flow

Tablo 3.2.1: Çalışmada kullanılan bulk-fill RBC'lerin yapısı

Materyal	Üretici	Tip	İçerik	Lot No
Sonicfill 2	Kerr (Orange, CA, ABD)	Sonik aktive Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 83.5, SiO ₂ , glass, oxide Matriks: : Bis-GMA, TEGDMA, Bis-EMA	8032275
VisCalor	Voco GmbH, (Cuxhaven, Almanya)	Termo-viskoz Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 83 Matriks: Bis-GMA, aliphatic dimethacrylate	2105318
Fill-up!	Coltene Holding AG, (Altstätten, İsviçre)	Dual-cure Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 65, zinc oxide Matriks: : TMPTMA, UDMA, Bis-GMA, TEGDMA, benzoyl peroxide, dibenzoyl peroxide	J89970
AdmiraFusion Xtra	Voco GmbH, (Cuxhaven, Almanya)	Ormocer esaslı Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 84.0, Ba-Al-Si-glass/ Silica Nanoparticles Matriks: Ormocer	2103629
Filtek Bulkfill	3M ESPE (St. Paul, MN, ABD)	Geleneksel Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 76.5, YbF ₃ , zirconium, silica Matriks: Bis-GMA, Bis-EMA, UDMA	NA29615
GrandioSo HeavyFlow	Voco GmbH, (Cuxhaven, Almanya)	Akıcı Bulk-fill	Doldurucu: (% wt.): 83, nanoparticles of SiO ₂ , glass-ceramic Matriks: BisGMA, BisEMA, TEGDMA, HDDMA, CQ, amine and BHT	2006513

3.3. Numunelerin Hazırlanması

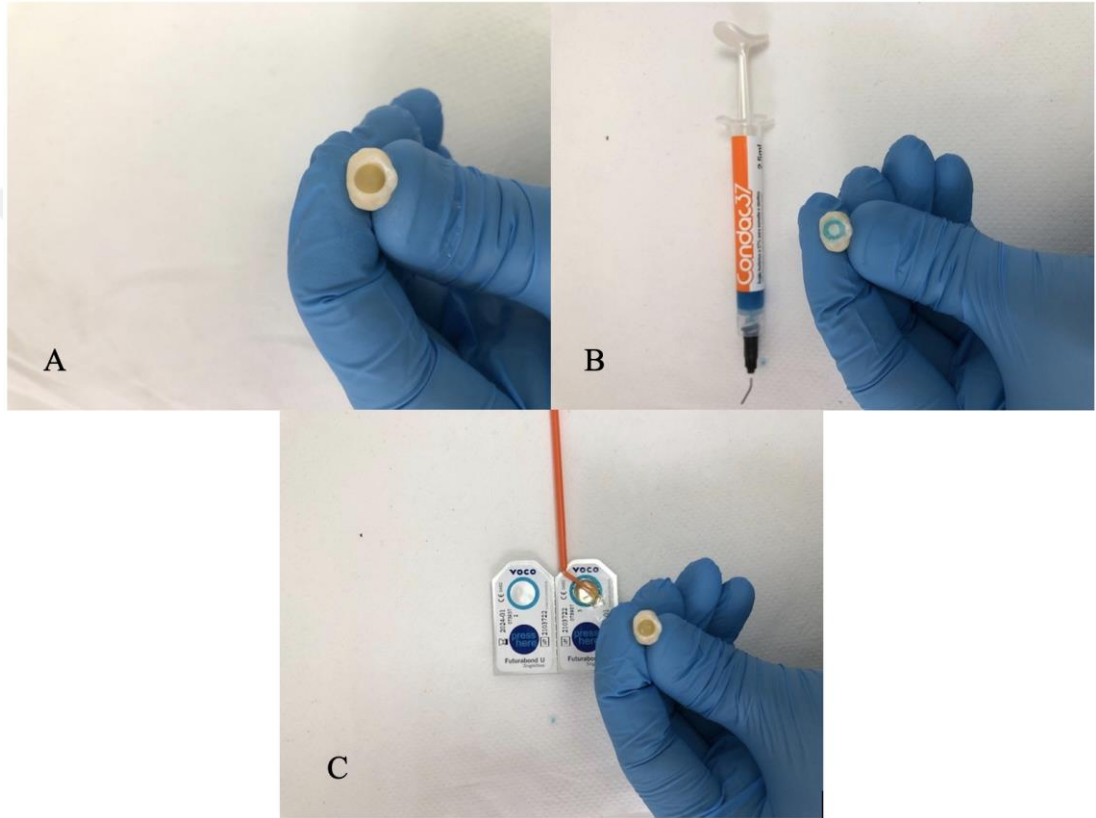
Tüm dişlerde, su soğutmalı yüksek hızlı döner el aleti (300.000 rpm) ile ISO standartlarına uygun, her beş kavite preparasyonunda değiştirilerek kullanılan elmas disk frezler ile her diş için 4,2 ($\pm 0,5$) mm çapında ve 4 ($\pm 0,5$) mm derinliğinde kavite tasarımına sahip standart Sınıf I kaviterler oluşturulmuştur. (Şekil 3.3.1 ve Şekil 3.3.2) Kaviterlerin boyutları son olarak ölçekli bir periodontal el aleti (Hu-Friedy, Rotterdam, Hollanda) kullanılarak kontrol edilmiştir.



Şekil 3.3.1: Kaviterler oluşturulurken kullanılan 4,2 mm çapındaki disk şekilli elmas frez

Restorasyon prosedürleri için standart olarak Selektif-etch tekniğine uygun olarak, mine kenarları, %37'lik fosforik asit kullanılarak 20 saniye boyunca dağlanmış, 10

saniye boyunca su ile durulanmış, ardından hafif hava ile kurutulmuştur. (Şekil 3.3.2) Daha sonra universal bir bağlayıcı ajan (FuturaBond U, Voco GmbH, Cuxhaven, Almanya), üreticinin önerilerine uygun olarak mine ve dentin yüzeylerine uygulanmış (Şekil 3.3.2) ve standart ışık çıkış gücü modunda (1000 mW/cm^2) bir LED ışık cihazı (Valo, Ultradent Products, South Jordan, UT, ABD) ile 10 saniye polimerize edilmiştir.



Şekil 3.3.2: Numunelerin hazırlanması (A: Standart kavitelerin oluşturulması, B: Mine kenarlarının asitle dağlanması ve C: Universal bağlayıcı ajan uygulanması)

Adeziv prosedürü takiben, dişler aşağıdaki tabloda bulunan materyallere ve polimerizasyon moduna göre rastgele on iki gruba ($n = 5$) bölünmüştür. Daha sonra bulk-fill RBC'ler, kavitelere üreticilerin önerilerine göre tek tabaka halinde uygulanmıştır. Test edilen kompozitler için, çalışma grupları ve uygulama prosedürleri Tablo 3.3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.3.1: Çalışma grupları ve uygulama prosedürleri

Materyal	Uygulama	Polimerizasyon modu	
		Işık çıkış gücü	Polimerizasyon süresi
Sonicfill 2	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s
VisCalor	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s
Fill-up!	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s
AdmiraFusion Xtra	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s
Filtek Bulkfill	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s
GrandioSo HeavyFlow	Tek tabaka	1000 mW/cm ²	20 s
		1400 mW/ cm ²	3 x 4 s

3.4. Mikro-CT Tarama Prosedürü

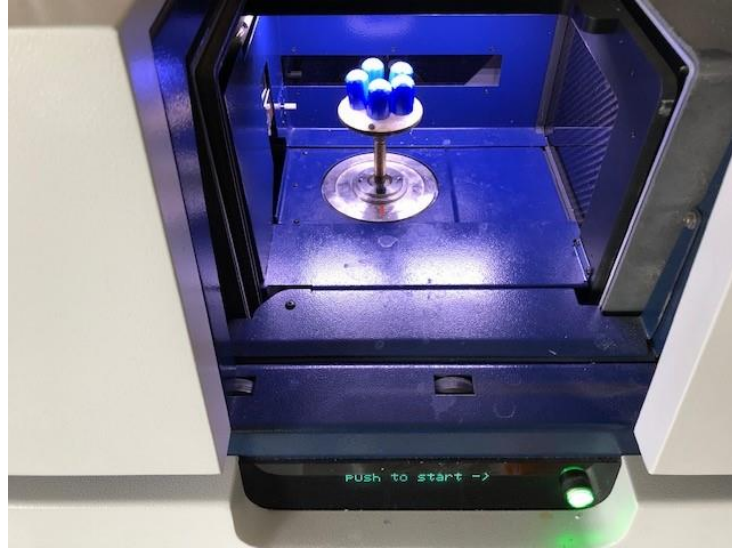
Tüm numuneler için ayrı ayrı olmak üzere mikro-CT taramaları üç işlem adımıyla gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ilk mikro-CT taraması, dişlerde kavite hazırlandıktan sonra kavitenin boyutlarını hacimsel olarak ölçerek gerçekleştirilmiştir. İkinci tarama ise, bağlayıcı ajan uygulamasından sonra bulk-fill RBC'ler kavitelere yerleştirildikten ancak polimerize edilmeden önce, kaviteye yerleştirilen polimerize olmamış rezin kompozit hacmini kaydedebilmek için yapılmıştır. Son tarama işlemi ise bulk-fill RBC'ler Tablo 3.3.1'de belirtildiği şekilde polimerize edildikten sonra polimerizasyondan sonraki hacimlerini tespit edebilmek için uygulanmıştır.

İlk taramada gruptaki dişler teker teker numaralandırılarak, kavite hacimleri ölçülmüştür. İkinci tarama prosedüründe ise bulk-fill rezin kompozitler önerilen şekilde kavitelere yerleştirilmiş ve polimerize edilmeden mikro-CT tutucusunun içine yerleştirilip ölçüm yapılmıştır. Bu aşamada istenmeyen polimerizasyonun önüne geçebilmek için dişler, tarama hassasiyetini engellemediği yapılan bir ön denemede ortaya konulan opak plastik bir örtücü ile örtülmüş ve mikro-CT cihazına yerleştirilmiştir. İkinci taramanın hemen ardından, örnekler mikro-CT'den çıkarılmış ve hemen polimerize edilmişlerdir. Polimerizasyon işlemi, bir LED ışık cihazı (Valo, Ultradent Products, South Jordan, UT, ABD) kullanılarak, standart ışık çıkış gücü modunda (1000 mW / cm²) her tabaka için 10 saniye ve son katman için 20 saniye olacak şekilde veya yüksek ışık çıkış gücü müdunda (1400 mW / cm²) her tabaka

için 2 x 4 saniye ve son katman için 3 x 4 saniye olacak şekilde iki farklı polimerizasyon modunda uygulanmıştır. Işık cihazının ışık çıkış gücü, her dişten sonra bir ışık radyometresi (Demetron, Danbury, CT, ABD) ile kontrol edilmiştir. Daha sonra tüm örnekler 24 saat boyunca distile su içerisinde bekletildikten sonra üçüncü ve son tarama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4.1: İstenmeyen polimerizasyonu önlemek için kompozit uygulanmış numunenin opak plastik örtü ile örtülmesi



Şekil 3.4.2: Her numunesine kompozit uygulanmış olan örnek bir grubun, polimerizasyon öncesi rezin kompozit hacminin ölçümü için Micro-CT cihazına yerleştirilmesi



Şekil 3.4.3: Diğer numuneler opak plastik örtü ile korunmaya devam ederken rezin kompozit polimerizasyonunun gerçekleştirilmesi

3.5. Mikro-CT Analizleri

Örnekleri taramak için yüksek çözünürlüklü, masaüstü Mikro-CT sistemi (Bruker Skyscan 1172, Kontich, Belçika) kullanılmıştır. Tarama koşulları, 100 kilovoltaj (kVp); 100 miliamper-saniye (mA); 0,5 mm alüminyum/bakır (Al/Cu) filtre; 5.2, 8.1, 11.2 ve 13.74 μm piksel boyutu; ve 0,5 adımda dönüş olacak şekilde ayarlanmış (103) ve halka artefaktlarını en aza indirmek için, her taramadan önce dedektörün hava kalibrasyonu yapılmıştır. Her numune için, 5 dakikalık entegrasyon süresi içinde 360 derece döndürülerek yapılan tarama işlemi ortalama 2 saat sürmüştür. Diğer ayarlar, ışın sertleşmesi düzenlemesini, bununla birlikte önceden tarama ve dişlerin yeniden yapılandırılmasına dayalı olarak üreticinin talimatlarına göre optimum kontrast limitlerinin girilmesini içermektedir.

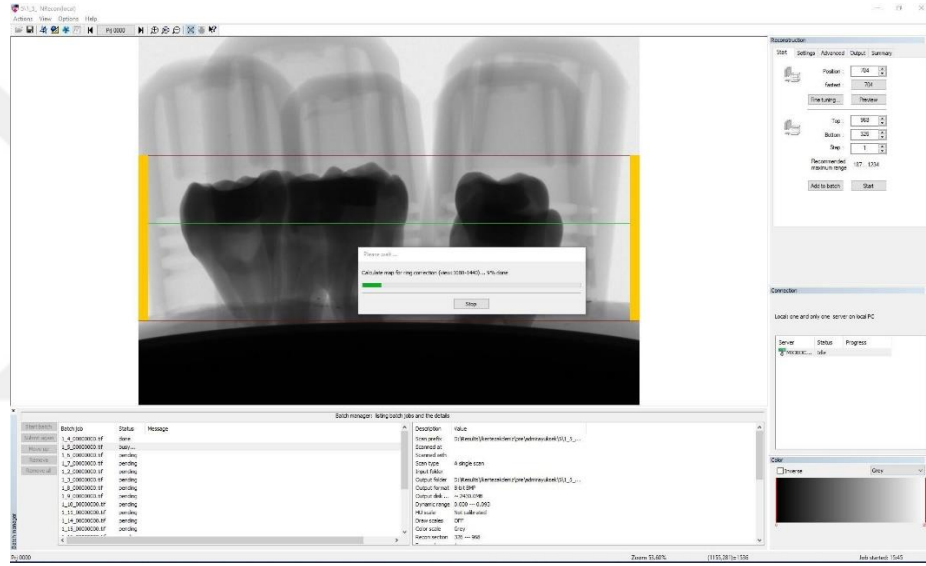


Şekil 3.5.1: Ölçümlerin gerçekleştirildiği Micro-CT cihazı

Elde edilen tarama verilerinin analizinde ise NRecon (ver. 1.6.10.4, SkyScan) ve CTan (ver. 1.16.1.0, SkyScan) yazılım programları aksiyal, 2D, 1.000 $\times$ 1.000 piksel

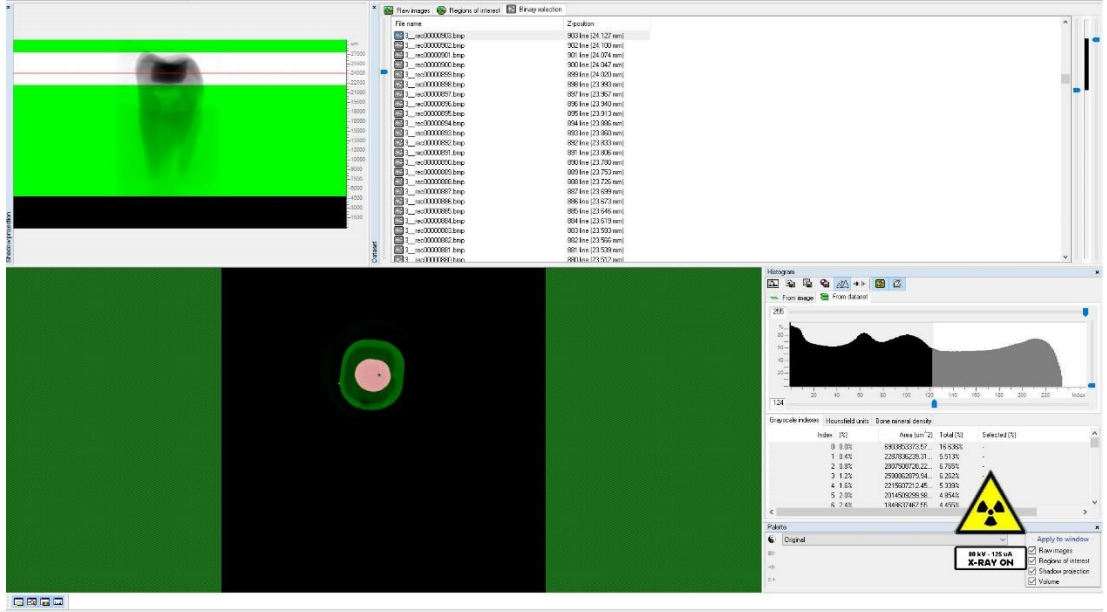
görüntüler elde etmek için, Feldkamp ve arkadaşları (97) tarafından açıklanan değiştirilmiş algoritmayı kullanarak örneklerin sırasıyla görselleştirilmesi ve nicel ölçümleri için kullanılmıştır. Yeniden yapılandırma parametreleri için, halka artifaktı düzeltilmesi ve yumuşatma sıfıra sabitlendi ve ışın artifaktı düzeltilmesi %40'a ayarlanmıştır.

NRecon yazılımı kullanılarak, tarayıcı tarafından elde edilen görüntüler, kurunun 2 boyutlu dilimlerini gösterecek şekilde yeniden yapılandırılarak, toplamda tüm hacimden 512 kesit görüntü yeniden oluşturulmuştur. Ayrıca restorasyonların 3 boyutlu hacimsel görselleştirilmesi, analizi ve hacim ölçümü için CTAn yazılımı kullanılmıştır.

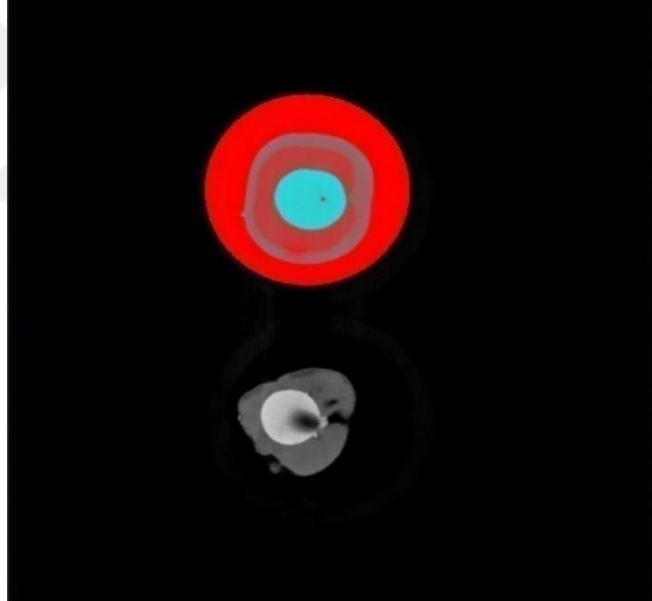


Şekil 3.5.2: Tarama sonrası NRecon yazılımı ile rekonstrüksiyon

Bu prosedür hem kürlenmemiş hem de kürlenmiş rezin kompozit hacimlerinin izole edilmesini ve ölçülmesini sağlamıştır. Daha sonra, rezin bileşiğinin büzülmesinin görüntülenmesi için kürlenmemiş görüntüden kürlenmiş görüntünün çıkarılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca polimerizasyon büzülmesi hacimsel yüzde olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.5.3: CTan yazılımı ile 3 boyutlu analiz edilecek bölgenin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi



Şekil 3.5.4: İlgi bölgesi yani analiz edilecek alanın her kesitte ayrı ayrı belirlenmesi

3.6. Hacimsel Değişikliklerin Hesaplanması

Gerçekleştirilen mikro-CT taramaları sonucu elde edilen tüm veriler mm^3 cinsinden kaydedilmiştir. Değerlendirilecek ilk parametre olan kaviteye yerleştirilmiş rezin kompozitin adaptasyon sonrasında kalan boşluk miktarının belirlenmesi için kavite hacimleri ile polimerize olmamış rezin kompozitlerin hacimleri arasındaki fark belirlenmiş ve kavite hacmine oranlanarak % cinsinden rezin kompozitin kaviteye

adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranı kaydedilmiştir. Benzer şekilde, rezin kompozitin hacimsel büzülmesini oransal olarak belirleyebilmek için polimerize olmuş ve olmamış rezin kompozitlerin örnekleri arasındaki hacimsel fark polimerize olmamış hacimsel değerlere oranlanmış ve % olarak kaydedilmiştir. Son olarak, kavite ile polimerize olmuş rezin kompozit arasındaki mikroboşluk oranı ise polimerize olmuş rezin kompozit hacmi ile kavite hacmi arasındaki farkın kavite hacmine oranlaması olarak % cinsinden hesaplanmıştır. (Tablo 3.6.1)

Tablo 3.6.1: Hacimsel değişikliklerin hesaplanması

Taramalar			Hesaplamalar		
Kavitenin hacmi	Polimerize olmamış RBC hacmi	Polimerize olmuş RBC hacmi	RBC'in hacimsel büzülmesi	RBC'in kaviteye adaptasyonu sonrası oluşan mikroboşluk oranı	Kavite ile polimerize olmuş RBC arasındaki mikroboşluk oranı
1. Ölçüm (Ö1) mm ³	2. Ölçüm (Ö2) mm ³	3. Ölçüm (Ö3) mm ³	% (Ö2-Ö3)/Ö2	% (Ö1-Ö2)/Ö1	% (Ö1-Ö3)/Ö1

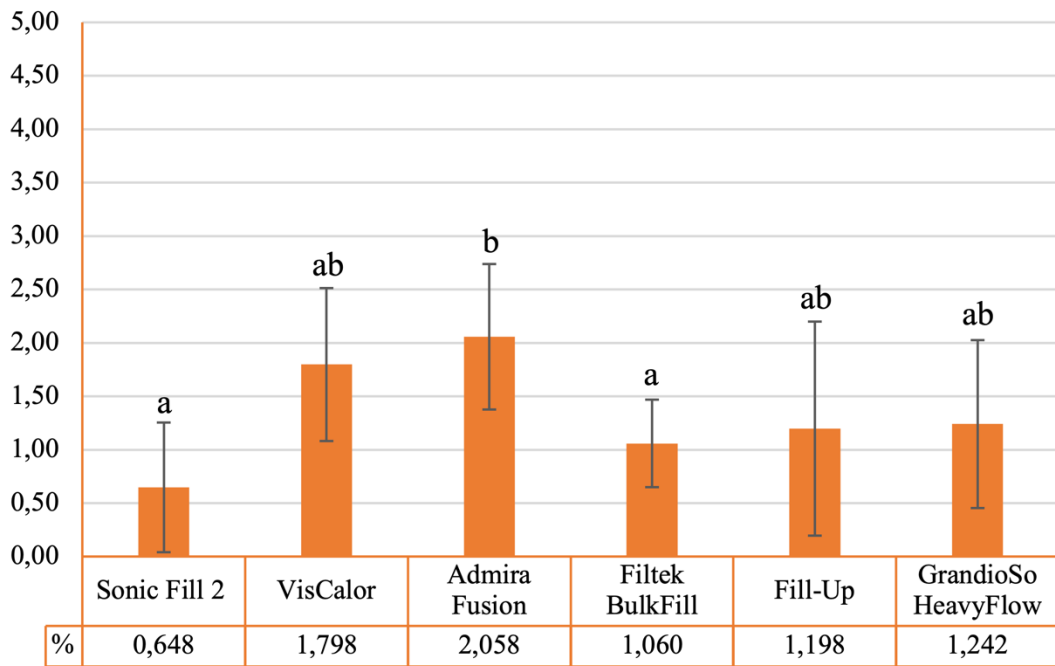
3.7. İstatistiksel Analiz

Mikro-CT taraması ile alınan verilerden hacimsel değişikliklerin hesaplanması sonucunda elde edilen verilerin incelenmesi için SPSS v20 for Mac programı kullanılmıştır. Değerlerin dağılımları Kolmogrov-Smirnov ve Saphiro-Wilks testi ile değerlendirildikten sonra tek yönlü varyans analizi (ANOVA) testi ve gruplar arasındaki farklılıklar için Duncan çoklu karşılaştırma testi ve bağımsız örnekler t-testi ile verilerin analizi gerçekleştirilmiştir. Anlamlılık düzeyi p=0,05 olarak belirlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Düşük Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Hacimsel Büzülme Bulguları

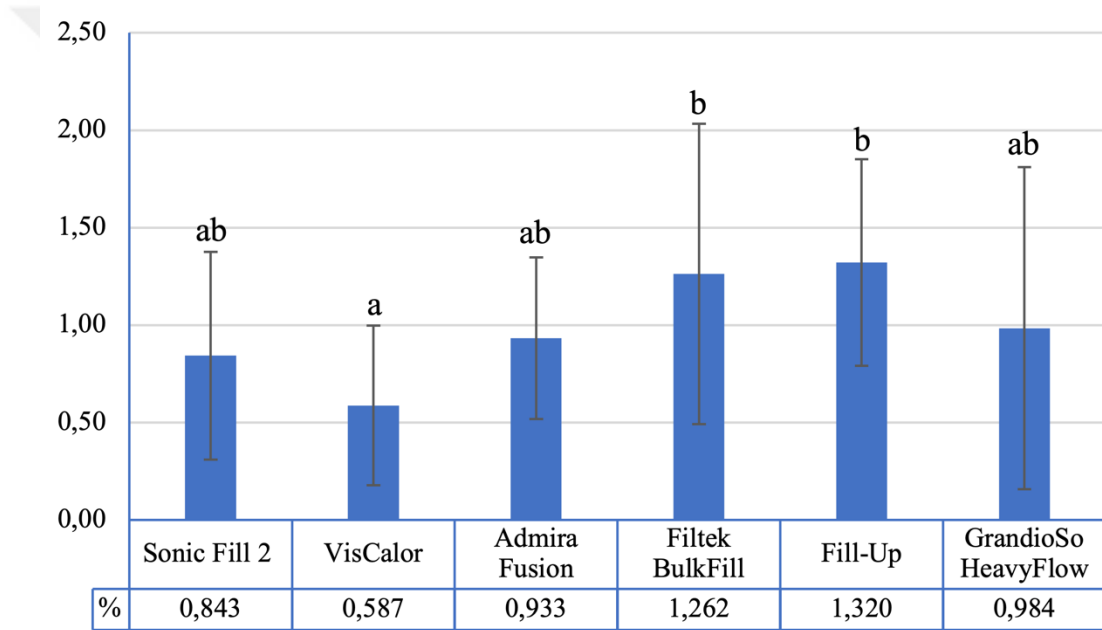
Düşük ışık gücünün uygulandığı polimerizasyon işlemi sonrası en yüksek hacimsel büzülme oranı %2,058 ile Admira Fusion grubunda görülmüştür. En az hacimsel büzülme oranı ise %0,648 ile Sonic Fill 2 grubunda tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak anlamlı fark ise sadece Sonic Fill 2 ve Filtek BulkFill grupları ile Admira Fusion grubu arasında görülmektedir ($p<0,05$). VisCalor, Fill-Up ve GrandioSo HeavyFlow gruplarının ise diğer herhangi bir grup ile aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). (Şekil 4.1.1)



Şekil 4.1.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranları. (Küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.2. Düşük Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kaviteye Adaptasyonu Sonrası Oluşan Mikroboşluk Bulguları

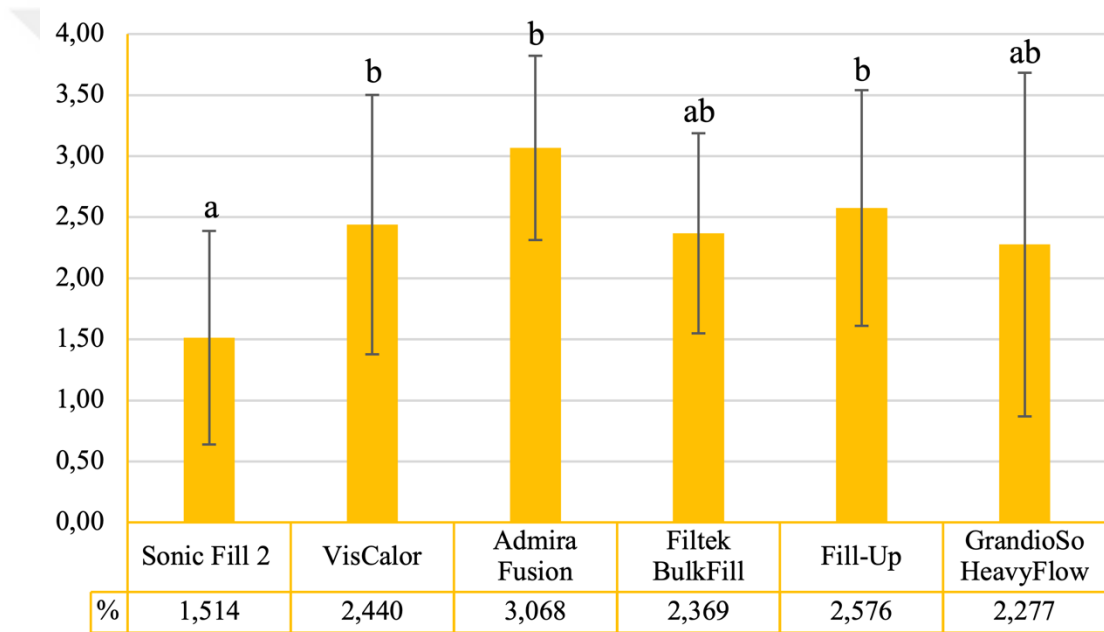
Düşük ışık gücünün uygulandığı gruplarda adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranlarına bakıldığında, en yüksek boşluk oranı %1,320 ile Fill-Up grubunda görülmektedir. En düşük mikroboşluk oranı ise %0,587 ile VisCalor grubuna aittir. VisCalor grubu ile Filtek ve Fill-Up grupları arasında ise istatistiksel olarak anlamlı seviyede fark bulunmuştur ($p<0,05$). Sonic Fill 2, AdmiraFusion ve Grandio gruplarının diğer herhangi bir grup ile istatistiksel olarak anlamlı bir farkı bulunamamıştır ($p>0,05$). (Şekil 4.2.1)



Şekil 4.2.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin kaviteye adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları. (Satırlardaki küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.3. Düşük Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları

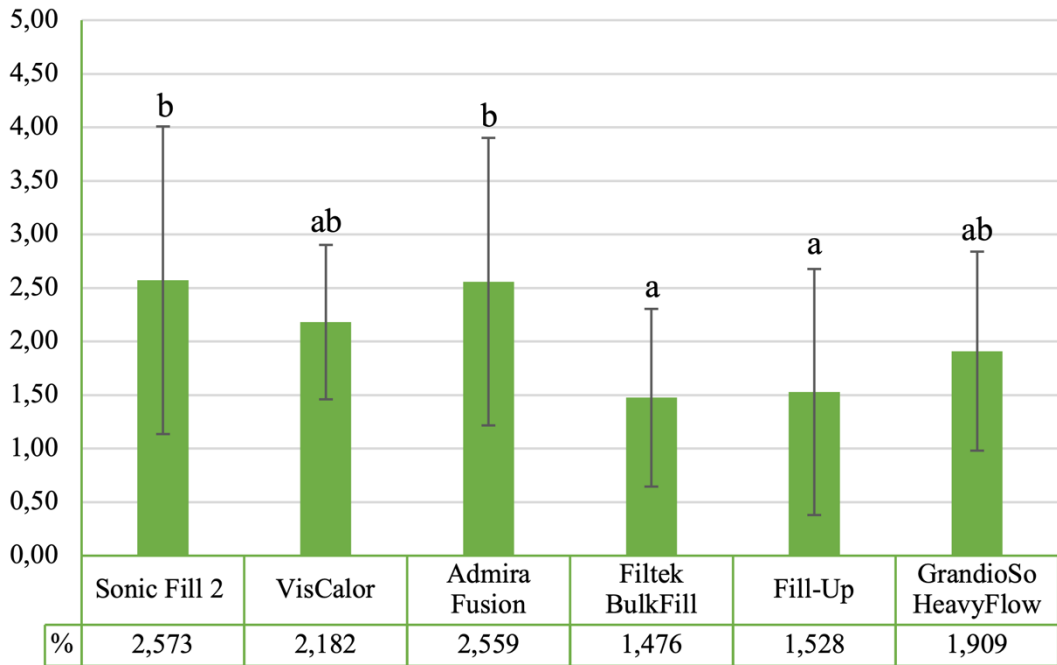
Düşük ışık gücü ile yapılan polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranı yüzdesel olarak incelendiğinde, en fazla mikroboşluk oranı %3,068 ile AdmiraFusion grubunda görülmüştür. En az mikroboşluk ise %1,514 ile Sonic Fill 2 grubunda görülmüştür. İstatistiksel olarak anlamlı fark ise Sonic Fill grubu ile VisCalor, AdmiraFusion ve Fill-Up grupları arasında bulunmaktadır ($p<0,05$). Filtek BulkFill ve GrandioSo gruplarının diğer grupları ile arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır ($p>0,05$). (Şekil 4.3.1)



Şekil 4.3.1: Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları. (Küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.4. Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Hacimsel Büzülme Bulguları

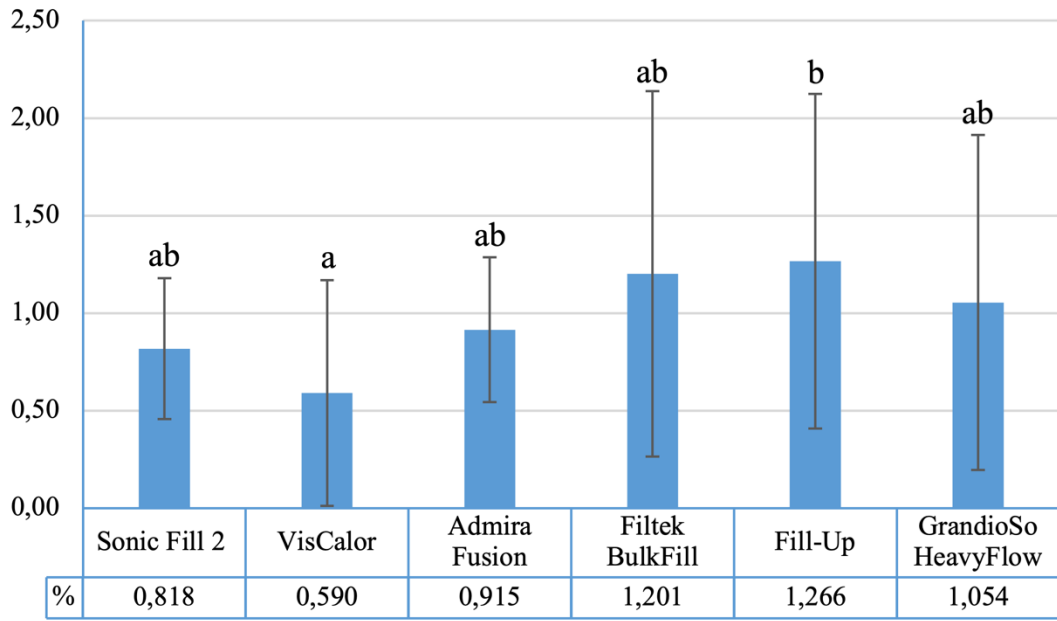
Yüksek ışık gücü ile polimerizasyon sonrası hacimsel büzülme oranlarına bakıldığında ise, en düşük hacimsel büzülme oranı %1,476 ile Filtek grubunda görülmektedir. En yüksek hacimsel büzülme oranı ise %2,559 ile Admira Fusion grubuna aittir. İstatistiksel olarak anlamlı fark, Filtek ve Fill-Up grupları ile Sonic Fill 2 ve AdmiraFusion grupları arasında görülmektedir ($p<0,05$). VisCalor ve GrandioSo gruplarının diğer gruplarla arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır ($p>0,05$). (Şekil 4.4.1)



Şekil 4.4.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranları. (Küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.5.Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları

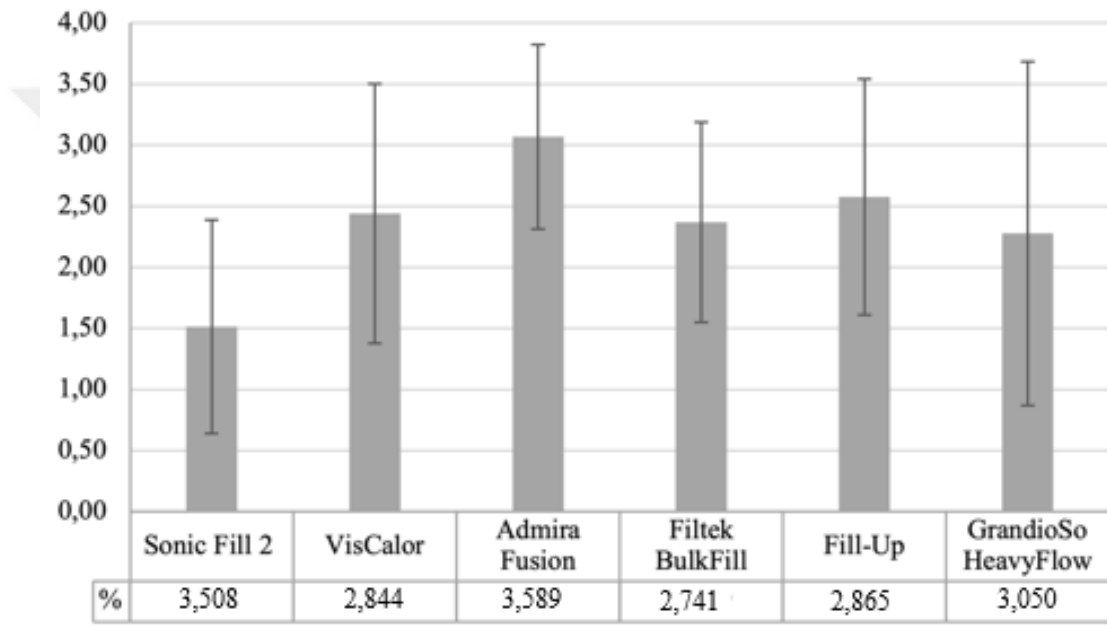
Yüksek ışık gücü ile polimerizasyonun gerçekleştirildiği gruplarda, kaviteye adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranına bakıldığında, en yüksek mikroboşluk oranı %1,266 ile Fill-Up grubunda görülmüştür. En düşük mikroboşluk oranı ise %0,590 ile VisCalor grubuna aittir. İstatistiksel analizlere göre, sadece VisCalor ile Fill-Up grupları arasında anlamlı fark bulunmuştur ($p<0,05$). (Şekil 4.5.1)



Şekil 4.5.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin kaviteye adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları. (Küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.6. Yüksek Işık Gücü ile Polimerize Edilen Bulk-Fill RBC'lerin Kavite ile Arasındaki Mikroboşluk Oranı Bulguları

Yüksek ışık gücü ile polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranlarına bakıldığında, en yüksek mikroboşluk oluşum oranı %3,589 ile AdmiraFusion grubuna aittir. En düşük mikroboşluk oluşum oranı ise %2,741 ile Filtek grubunda tespit edilmiştir. Yüksek ışık gücü ile polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları incelendiğinde gruplar arasında anlamlı seviyede fark bulunmamaktadır ($p>0,05$). (Şekil 4.6.1)



Şekil 4.6.1: Yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları. (Küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. ($p<0,05$))

4.7. Bulk-Fill RBC'lerin Farklı Işık Gücü Seviyeleri ile Polimerize Edilmesinin Etkilerine Ait Bulgular

Farklı ışık gücü seviyeleri ile polimerize edilen rezin kompozitlerin hacimsel büzülmelerine ait bulgular Tablo 4.7.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7.1: Rezin Kompozitin Hacimsel Büzülmesi

	Sonic Fill 2	VisCalor	Admira Fusion	Filtek BulkFill	Fill-Up	GrandioSo HeavyFlow
Düşük Güç	0,648 ± 0,608 (a, A)	1,798 ± 0,716 (ab)	2,058 ± 0,681 (b)	1,060 ± 0,409 (a)	1,198 ± 1,003 (ab)	1,242 ± 0,786 (ab)
Yüksek Güç	2,573 ± 1,436 (b, B)	2,182 ± 0,720 (ab)	2,559 ± 1,341 (b)	1,476 ± 0,829 (a)	1,528 ± 1,148 (a)	1,909 ± 0,929 (ab)
Satırlardaki küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05). Sütunlardaki büyük harfler ise Bağımsız t-Testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05)						

Düşük ışık gücüyle polimerizasyon ile yüksek ışık gücü ile polimerizasyon karşılaştırıldığında, bütün gruplarda yüksek ışık gücü ile polimerizasyonda daha fazla hacimsel polimerizasyon büzülmesi görülmektedir. Bununla birlikte istatistiksel olarak sadece Sonic Fill 2 grubunda yüksek ışık gücü ile polimerizasyon, düşük ışık gücü ile polimerizasyondan anlamlı derecede daha fazla hacimsel büzülmeye neden olmuştur (p<0.05). Diğer rezin kompozitlerde düşük ışık gücü ya da yüksek ışık gücü uygulamak arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır (p>0,05).

Farklı ışık gücü seviyeleri ile polimerize edilen rezin kompozitlerin kaviteye adaptasyonu sonrası oluşan mikroboşluk seviyeleri yüzdesel olarak Tablo 4.7.2'de gösterilmektedir.

Düşük ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitler ile yüksek ışık gücü ile polimerize edilen rezin kompozitlerin adaptasyon sonrası oluşan mikroboşluk oranları karşılaştırıldığında, hiçbir rezin kompozit grubunda anlamlı bir fark bulunamamıştır. (p>0,05)

Tablo 4.7.2: Rezin Kompozitin Kaviteye Adaptasyon Sonrası Oluşan Mikroboşluk Oranı

	Sonic Fill 2	VisCalor	Admira Fusion	Filtek BulkFill	Fill-Up	GrandioSo HeavyFlow
Düşük Güç	0,843 ± 0,533 (ab)	0,587 ± 0,410 (a)	0,933 ± 0,415 (ab)	1,262 ± 0,770 (b)	1,320 ± 0,530 (b)	0,984 ± 0,827 (ab)
Yüksek Güç	0,818 ± 0,362 (ab)	0,590 ± 0,579 (a)	0,915 ± 0,371 (ab)	1,201 ± 0,937 (ab)	1,266 ± 0,858 (b)	1,054 ± 0,859 (ab)
Satırlardaki küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05). Sütunlardaki büyük harfler ise Bağımsız t-Testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05)						

Farklı ışık gücü seviyeleri ile polimerize edilen rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası oluşan mikroboşluk seviyelerine ait oranlar yüzdesel olarak Tablo 4.7.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.7.3: Kavite ile Polimerize olmuş Rezin Kompozit Arasındaki Mikroboşluk Oranı

	Sonic Fill 2	VisCalor	Admira Fusion	Filtek BulkFill	Fill-Up	GrandioSo HeavyFlow
Düşük Güç	1,514 ± 0,875 (a, A)	2,440 ± 1,063 (b)	3,068 ± 0,755 (b)	2,369 ± 0,820 (ab)	2,576 ± 0,964 (b)	2,277 ± 1,407 (ab)
Yüksek Güç	3,508 ± 1,720 (B)	2,844 ± 0,770	3,589 ± 1,210	2,741 ± 0,862	2,865 ± 0,783	3,050 ± 1,705
Satırlardaki küçük harfler, Tek Yönlü Varyans Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05). Sütunlardaki büyük harfler ise Bağımsız t-Testi sonuçlarına göre istatistiksel farklı grupları göstermektedir. (p<0,05)						

Bütün rezin kompozitlerde, yüksek ışık gücü ile polimerizasyon, düşük ışık gücü ile polimerizasyondan daha fazla mikroboşluk oluşumuna neden olmuştur. Ancak sadece Sonic Fill 2 grubunda yüksek ışık gücü ile polimerizasyon, düşük ışık gücü ile polimerizasyondan anlamlı derecede daha fazla mikroboşluk oluşumuna neden olmuştur (p<0,05). Diğer hiçbir rezin kompozit grubunda, farklı ışık gücü ile polimerizasyonun mikroboşluk oluşumuna anlamlı bir etkisi bulunmamıştır (p<0,05).

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, altı farklı bulk-fill rezin kompozit (BRBC), farklı ışık gücü seviyeleri ile polimerize edilip, hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk değerleri incelenmiştir.

Test edilen bulk-fill RBC'lerin değerleri incelendiğinde, bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı seviyede farklılıklar tespit edilmiştir ($p>0,05$) ve birinci sıfır hipotez reddedilmiştir. Ayrıca, yüksek ışık gücü ile polimerizasyonda, düşük ışık gücü ile polimerizasyona göre daha yüksek hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oranları elde edilmiş ve ikinci sıfır hipotez reddedilmiştir.

Restorasyonların ve adeziv sistemlerin değerlendirilmesinde klinik çalışmalar, laboratuvar çalışmalarına göre gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayan yöntemlerdir. Ancak uzun dönem klinik takibin zaman alıcı olmasıyla birlikte standardize edilmesi zor olduğundan, laboratuvar testleri dental materyallerin ve tekniklerin değerlendirilmesinde daha sık kullanılmaktadır.(104) Laboratuvar testlerinin avantajları arasında verilerin elde edilmesi ve toplanmasının daha hızlı olması, görece daha kolay yapılabilmesi, diğer bütün değişkenlerin sabitlenerek odaklanılan tek bir parametrenin ölçülebilir olması, tek çalışma düzeneği ile birden fazla deney grubunun eş zamanlı olarak test edilebilir olması sayılabilir. (105) Güncel materyaller kullanılarak yapılan bu çalışma in-vitro ortamda gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde, RBC'lerin mikro-CT aracılığıyla incelendiği in-vitro çalışmalarda sığır dişleri kullanılmaya devam etmektedir.(106) Fakat ISO yayınladığı bildirmede, sığır dişleri ile insan dişleri arasında birçok benzerlik olmasına rağmen, özünde biyolojik, kimyasal, fiziksel ve morfolojik yönden önemli farklılıklar bulunduğundan, in vitro çalışmalarda insan dişleri ile çalışılmasını tavsiye etmektedir.(107) Anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek ve klinik açıdan daha kabul edilebilir sonuçlar elde etmek adına bu çalışmada insan büyük azı dişleri kullanılmıştır.

Çalışılması planlanan dişlerin, çalışma öncesinde bekletilirken, bekletildiği saklama koşulları da oldukça önemlidir. Dişlerin bekletildiği sıvıların içeriği, sıvının sıcaklığı ve saklama süresi belirlenirken, dişlerin yapısal içeriğinin zarar görmemesi adına en

uygun koşullar oluşturulmalıdır. ISO, deney için kullanılacak dişlerin buzdolabında +4°C’de distile su içerisinde veya %0,5’lik kloramin-T solüsyonu içerisinde en fazla bir hafta bekletilmesini önermektedir. Ardından tekrar +4°C’de distile suda bekletilmelidir. Bununla birlikte ISO, dişlerin çekiminin ardından en fazla 6 ay içerisinde kullanılması gerektiğini belirtmiştir.(108) Bu çalışmada kullanılan dişlerin saklama koşulları ve süreleri, ISO önerilerine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Adeziv diş hekimliğindeki en önemli yeniliklerden biri son yıllarda klinik uygulamada kullanımları artan universal adeziv sistemlerdir. Bu adezivler, self-etch (SE) adeziv, etch-and-rinse (EaR) adeziv olarak ya da dentin üzerinde self-etch ve mine üzerinde “etch and rinse” şeklinde kullanılabildikleri için “çok modlu” veya “çok amaçlı” adezivler olarak bilinirler.(109, 110) Dentine bağlanmada SE, mineye bağlanmada EaR sistemlerin kullanılmasının günümüz adeziv diş hekimliği çalışmalarında tavsiye edilmesi ile birlikte, güncel universal adezivler minenin fosforik asitle dağlanması ve dentine direkt uygulama sağlayan “selektif-etch” tekniğine imkan vermektedirler. (111, 112) Yapılan bir meta-analiz çalışmasında, Anna Szesz ve ark.(113) restorasyonlarda selektif-etch yöntemi uygulamanın, RBC’lerin klinik performansını arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca de Goes ve ark.(114), mine yüzeyine seçici olarak asit uygulanmasının, universal adezivin klinik performansını arttırdığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da selektif-etch yöntemine uygun olarak mine yüzeyi %37’lik ortofosforik asit ile dağlanmış, durulanmış ve hafif hava ile kurutulduktan sonra universal adeziv mine ve dentin yüzeylerine üreticinin önerilerine göre uygulanmıştır.

RBC’lerin hem optik hem de mekanik özellikleri gelişmeye devam etmektedir. Bununla birlikte kırılmaya karşı direnç, polimerizasyonundan kaynaklanan hacimsel büzülme ve polimerizasyon stresinin gelişimi gibi bazı kısıtlamaları hala devam etmektedir.(115, 116) Günümüzde, geleneksel RBC’lerin yapısal eksikliklerinin ve uygulamalarındaki kısıtlamaların önüne geçebilmek için bulk-fill RBC’ler, direkt restorasyonlarda tercih edilen materyallerden biri olarak sunulmuştur. Bu çalışmada, en güncel altı farklı bulk-fill RBC restoratif materyaller; SonicFill 2 (Kerr, ABD), VisCalor (Voco GmbH, Almanya), AdmiraFusion Extra (Voco GmbH, Almanya), Filtek Bulkfill (3M Espe, ABD), Fill-Up (Coltene Holding AG, İsviçre) ve GrandioSO Heavy Flow (Voco GmbH, Almanya) hacimsel polimerizasyon

büzülmesi ve mikroboşluk oluşumu yönünden incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Polimerizasyon büzülmesi, diş hekimlerinin direkt rezin kompozit restorasyonları yerleştirirken yaşadığı en önemli endişelerden biridir. Dimetakrilat bazlı rezin kompozitlerin polimerizasyon sonrası çoğu zaman %2 ila %6 aralığında önemli hacimsel büzülme meydana getirdikleri gösterilmiştir. (117) Polimerizasyon sırasında monomer moleküllerinin polimer ağına dönüşümünün, moleküllerin daha yakın bir şekilde paketlenmesine yol açarak toplu büzülmeye neden olduğu bildirilmiştir. (118) Fog ve ark. (119) dental rezin kompozitlerin, sertleşme sırasında büzüldüğünü ve bunun sonucunda restorasyonların ara yüzeyindeki bağlantının koparak restorasyonun ön görülenden daha erken başarısız olmasına yol açtığını bildirmişlerdir. Fotopolimerizasyondan 24 saat sonrasına kadar meydana gelen büzülmeye "postpolimerizasyon" büzülmesi adı verilmiştir ve bu süre boyunca, dönüşüm derecesinin önemli ölçüde değişmediği, ancak serbest radikallerin konsantrasyonunun azaldığı belirtilmiştir.(120) Bu çalışmada bütün bulk-fill RBC'ler, ışıkla polimerize edildikten sonra (dual cure bulk-fill RBC'ler de kimyasal sertleştirmelerini tamamladığında) 24 saat boyunca distile suda bekletilmiş ve ardından hacim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Polimerizasyon büzülmesinden sorumlu faktörler doldurucu içeriği, dönüşüm derecesi, elastik modülü, su emilimi, C faktörü vb. şeklinde sıralanabilir. Feilzer ve ark.(42), büzülme stresi seviyesini kavite konfigürasyonu ile ilişkilendirmek için konfigürasyon faktörü (C-faktörü) kavramını geliştirmiştir. C faktörü arttıkça, büzülme stresi de artmaktadır. Geleneksel kavite dizaynları düşünüldüğünde, en yüksek C faktör oranı sınıf 1 kavitelere aittir.(121) Sampaio ve ark.(122) mikro-CT aracılığıyla RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmelerini inceledikleri çalışmada numunelerde Sınıf 1 kavite oluşturmuşlardır. Bu çalışmada da test edilen bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi davranışlarının üst limitlerini test edebilmek adına, bütün numunelerde C faktörü değerinin en yüksek olduğu kavite dizaynı olan dairesel geleneksel sınıf 1 kavite oluşturulmuştur.

Mikro-CT cihazları, çeşitli araştırmalar ve uygulamalarda kullanılmak üzere hızla akademik ve endüstriyel araştırma laboratuvarlarının temel bileşenleri haline gelmiştir.(123) Mikro-CT sistemleri, mikro yapıları, kusurları, yoğunluk ve morfolojideki farklılıkları analiz etme fırsatı sunar. Mikro-CT aracılığı ile, diş-

restorasyon arayüzeyleri de incelenebilmektedir.(124) Kim ve ark.(125), mikro-CT cihazını doğrudan ölçüm, 3D tarayıcı ve fotoğraf yöntemleri ile karşılaştırmış, dış iç ve dış dokularının incelenmesinde mikro-CT cihazının güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Mikro-CT cihazının rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi ölçümünde oldukça başarılı olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir.(126) Bu çalışmada, bulk-fill RBC'lerin polimerizasyon büzülmesi hacmini ve mikroboşluk oluşumunu araştırmak için micro-CT cihazı kullanılmıştır.

Sampaio ve ark.(122) dört farklı akışkan bulk-fill RBC'nin hacimsel polimerizasyon büzülmesini mikro-CT aracılığı ile incelemişlerdir. Kavite, polimerizasyon öncesi ve sonrası olacak şekilde her numunenin hacmini 3 kez ölçmüşler ve bulk-fill RBC'leri kendi aralarında karşılaştırdıklarında anlamlı seviyede farklılıklar tespit etmişlerdir ($p<0,05$). Gerçekleştirilen bu çalışmada da farklı bulk-fill RBC'ler birbirleri ile karşılaştırıldıklarında anlamlı derecede farklılıklar bulunmuştur ($p<0,05$) ve her iki çalışmanın bulguları bu açıdan benzerlik göstermektedir

Yine Sampaio ve ark. (127), sınıf 1 kavitelere beş farklı bulk-fill RBC'yi uygulamışlar ve en düşük hacimsel büzülme oranını Tetric Evoceram Bulk Fill ve Filtek BulkFill gruplarında tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmada da yüksek ışık gücü ile polimerizasyonda en düşük hacimsel büzülme oranı Filtek BulkFill grubunda görülmüştür ve bulgular bu yönden benzerlik göstermektedir. Filtek BulkFill'in içeriğine yüksek moleküler ağırlıklı modifiye bir ürethan dimetakrilat (AUDMA – aromatik ürethan dimetakrilat) eklenmiştir, düşük hacimsel büzülmenin nedeni bu değişiklik olabilir. Üretici, yüksek moleküler ağırlıklı monomerlerin oranlarının ayarlanmasıyla, Filtek BulkFill'in düşük polimerizasyon büzülmesi üreterek daha düşük stres oluşturacağını iddia etmektedir.(128)

Alüminyum bloklara yerleştirilen bir hibrit, üç akışkan bulk-fill RBC ve iki kondanse edilebilen bulk-fill RBC'nin hacimsel büzülme oranlarının mikro-CT aracılığıyla incelendiği bir başka çalışmada ise, en düşük büzülme oranı %1,2 ile Sonic Fill grubunda görülmüştür.(129) Bu, en yüksek doldurucu içeriğine Sonic Fill grubunun sahip olması ile açıklanabilir. Polimerizasyon büzülmesinin kapsamı, monomerlerin hareketliliğine, moleküler ağırlığına ve işlevselliğine bağlıdır(130). İnorganik doldurucu yüzdesi, akışkanlığı ve viskoziteyi etkiler(131), yüksek doldurucu içeriğinin daha az hacimsel büzülme neden olması beklenebilir. Ayrıca, Junior ve ark.(132) da yaptıkları çalışmada, bulk-fill RBC'lerin hacimsel büzülme seviyelerini

karşılaştırmış ve en düşük büzülme oranı yine Sonic Fill grubunda tespit edilmiştir(132). Gerçekleştirilen bu çalışmada da, düşük ışık gücü uygulanan gruplar arasında en düşük hacimsel büzülme oranı Sonic Fill 2 grubuna aittir.

Bu çalışmada kullanılan Fill-Up! ve AdmiraFusion x-tra bulk-fill RBC'lerin polimerizasyon sonrası hacimsel değişimi ile ilgili literatürde çok az çalışma bulunmaktadır. JS Grenier ve ark. (133) yapmış oldukları çalışmada, bulk-fill RBC'lerin polimerizasyon sonrası hacimsel değişimini polimerizasyondan 24 saat sonra ölçmüşler ve en yüksek büzülme oranının Fill-Up! grubunda görüldüğünü belirtmişlerdir. Bu durum, Fill-Up!'ın yeni çapraz bağlama ajanı TMPTMA'dan kaynaklanıyor olabilir.(133) Rizzante ve ark.(81) bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi değerlerini karşılaştırmış, x-Tra Fil (Voco)'in ardından en düşük değeri AdmiraFusion x-tra grubunda tespit etmişlerdir. Aksine gerçekleştirilen bu çalışmada, düşük ışık gücü ile polimerizasyon sonrası en yüksek oranda büzülme AdmiraFusion x-tra grubunda görülmüştür. Bu farklılığın nedeni, yapmış oldukları çalışmada polimerizasyon sonrası hacim ölçümü öncesinde, ‘post polimerizasyon’ büzülmesi için bulk-fill RBC'leri polimerizasyon sonrası 24 saat bekletmemeleri olabilir. Resin kompozitlerin polimerizasyonu ve dönüşümü, ışıkla sertleştirildikten sonraki 24 saate kadar devam etmektedir.(134)

Literatürde, VisCalor ve GrandioSo Heavy Flow bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzölmelerine dair herhangi bir çalışma bulunmamasına rağmen, bu yeni bulk-fill RBC'ler hakkında testler yapılmaya devam etmektedir. Can ve ark. (135) üç bulk-fill RBC ve bir RBC'yi karşılaştırdıkları çalışmada, resin kompozitleri belirli koşullarda saklayarak Vickers sertliklerini ölçmüşler, başlangıçta ve 30 günlük saklamanın ardından en yüksek Vickers sertlik değerini VisCalor grubunda tespit etmişlerdir. Jager ve ark. (136) GrandioSo Heavy Flow'un yüzey sertliğini incelemiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, hacimsel polimerizasyon büzölmesi değerlerine bakıldığında, VisCalor ve GrandioSo Heavy Flow gruplarının diğer hiçbir grup ile aralarında anlamlı bir fark bulunamamıştır ($p>0,05$).

RBC restorasyon içerisindeki boşluklar, resin kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek istenmeyen gözeneklerdir.(137) RBC kütlesinin içindeki iç boşluklar RBC'nin dayanıklılığını azaltabilir ve restorasyonlarda kırılma ve başarısızlıklara neden olabilir.(138) Demirel G ve ark.(139) kondanse edilebilen bulk fill RBC'ler; SonicFill 2; VisCalor Bulk; Filtek One Bulk fill restoratif; Tetric

EvoCeram Bulk Fill ve geleneksel posterior RBC, Clearfil Majesty Posterior'in boşluk oranlarını değerlendirmek için mikro-CT cihazını kullanmışlardır. SonicFill 2 dışındaki bütün rezin kompozitler, sonik aktivasyon metodu uygulandığında diğer metodlara daha fazla mikroboşluk oluşumu göstermiştir ($p<0,05$). SonicFill 2 haricindeki rezin kompozitlerde, ön ısıtma (pre-heating) metodu uygulandığında daha düşük mikroboşluk oranları tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, her ne kadar yerleştirme metotları karşılaştırılmamış olsa da kaviteye adaptasyon sonrası en düşük mikroboşluk oluşumu ön ısıtma (pre-heating) metoduyla uygulanan VisCalor grubunda görülmüştür.

Yapılan bir çalışmada geleneksel RBC, cam iyonomer ve dört adet bulk-fill RBC kullanılmış, en yüksek iç boşluk oluşumu oranı Fill-Up! grubunda görülmüştür.(140) Bu durum, Fill-Up!'ın reolojik özelliklerinden, adeziv ve dentin arasındaki zayıf etkileşimden ve yüksek polimerizasyon stresinden kaynaklanıyor olabilir. Self-cure modu, baz ve katalizör macunlarının karıştırılmasından hemen sonra polimerizasyon reaksiyonunu başlattığından, izole edilmiş polimerizasyon çekirdeklerinin erken oluşumu, materyal ve kavite duvarı arasındaki uygun teması bozabilir.(141) Gerçekleştirilen bu çalışmada da, kaviteye adaptasyon sonrası en yüksek oranda mikroboşluk oluşumu Fill-Up! grubunda görülmüştür.

Demirel G ve ark. (103) bir geleneksel kondanse edilebilen (Filtek Ultimate Universal Restorative-kontrol), bir geleneksel akışkan (Filtek Ultimate Flowable Restorative), iki akışkan bulk-fill (Voco X-trabase ve SDR) ve bir kondanse edilebilen bulk-fill (Filtek One BulkFill Restorative) rezin kompozit uygulayarak boşluk oluşumunu mikro-CT aracılığıyla değerlendirmiş ve Filtek One BulkFill'in en düşük mikroboşluk oranına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Filtek One BulkFill, kaviteye yerleştirildiğinde hafifçe yoğunlaşır ve plastik haldeki bir polimer malzemeye basınç uygulamanın boşluk miktarını önemli ölçüde azaltabileceği açıktır.(142) Ayrıca bu materyalin tek tabaka uygulanması sayesinde tabakalar arasında boşluk oluşumu engellenebilir. Gerçekleştirilen bu çalışmada da yüksek ışık gücü ile polimerizasyon sonrası en düşük mikroboşluk oluşum oranı Filtek BulkFill grubunda görülmüştür.

Admira Fusion x-Tra ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bir çalışmada, 4 farklı bulk-fill RBC'le yapılan restorasyonların arayüzey boşluk oluşumu incelenmiş ve soft start kürleme modunda en düşük ara yüzey boşluk

oluşum oranı AdmiraFusion x-tra grubunda görülmüştür.(143) Başka çalışmada ise 4 farklı bulk-fill RBC ile yapılan restorasyonlarda oluşan marjinal boşluklar incelenmiş ve AdmiraFusion x-tra'nın Filtek Supreme XTE dışında herhangi bir bulk-fill RBC ile arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir.(144) Bu çalışmada da, yüksek ışık gücü ile polimerizasyon gerçekleştirildiğinde AdmiraFusion x-tra'nın herhangi bir bulk-fill RBC ile arasında anlamlı seviyede bir fark gözlemlenmemiştir. ($p>0,05$).

Uygulanan ışık gücü yoğunluğu da RBC'nin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Besegato ve ark.(145) yapmış oldukları bir çalışmada, 3 farklı bulk-fill RBC'ye "VALO® Cordless (Ultradent Products, South Jordan, UT, USA)" ışık cihazının standart güç modu protokolü (Sp) (1000 mW/cm^2) ve Xtra güç modu protokolünü (Xp) (3200 mW/cm^2) uygulayarak ışık gücü yoğunluğunun polimerizasyon büzülmesine etkisini mikro-CT aracılığıyla incelemişlerdir. Analiz edilen tüm rezin kompozitler için, Xp modunda gözlemlenen hacimsel polimerizasyon büzülmesini Sp'e kıyasla daha yüksek tespit etmişlerdir. 3200 mW/cm^2 'lik ışık polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmış, bulk-fill RBC'nin viskoelastik akışını azaltmış ve sonuç olarak sertleştirme sırasında daha fazla büzülmeye neden olmuş olabilir.(146, 147) Daha uzun bir zaman aralığında düşük güçlü ışık, yüksek güçlü ışık ile karşılaştırıldığında, daha yüksek moleküler ağırlıklı daha uzun zincirler oluşturulduğundan rezin kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştiren daha yavaş bir polimerizasyon sağlar.(148) Bu çalışmada da, bütün bulk-fill RBC'ler daha yüksek ışık gücü ile polimerize edildiğinde daha fazla hacimsel polimerizasyon büzülmesi göstermiştir ve her iki çalışmanın bulguları bu açıdan benzerlik göstermektedir.

Başka bir çalışmada, 4 farklı RBC yüksek yoğunluklu ($1,200 \text{ mW/cm}^2$) ve düşük yoğunluklu (650 mW/cm^2) ışık güçlerinde polimerize edilerek ışık gücü yoğunluğunun hacimsel polimerizasyon büzülmesine etkisi değerlendirilmiştir.(149) Farklı ışık gücü uygulamanın, hacimsel polimerizasyon büzülmesine anlamlı bir etkisi bulunamamıştır ($p>0,05$). Bu çalışmada da sadece Sonic Fill 2 grubunda yüksek ışık gücü uygulandığında anlamlı derecede daha fazla hacimsel polimerizasyon büzülmesi gözlemlenmiştir ($p<0,05$). Sonic Fill 2 dışında hiçbir bulk-fill RBC'de farklı ışık gücü ile polimerizasyonun, hacimsel polimerizasyon büzülmesine anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p>0,05$).

İlginç bir çalışma da Almeida ve ark.(150) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sınıf 1 kavitelere uygulamış oldukları bulk-fill RBC'lerde, hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oluşumu olgularının arasında bir korelasyon olup olmadığını mikro-CT aracılığıyla incelemiş, polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oluşumu arasında sırasıyla orta ve zayıf pozitif korelasyon olduğunu tespit etmişlerdir. Regresyon analizleri, mikroboşluk hacminin %94,5'inin arttığını, yani nihai mikroboşluk hacminin polimerizasyon büzülmesinden kaynaklandığını göstermiştir. Bu durum, monomerlerin daha küçük bir alanda moleküler yeniden düzenlenmesi ve polimerizasyon büzülmesi kuvvetlerinin bu bölge etrafındaki mikroboşluğu arttırabileceği fikriyle açıklanabilir.(151) Bu çalışmada da, ışık gücü seviyesi arttırıldığında, hem mikroboşluk oranı , hem hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranı bütün bulk-fill RBC'lerde artmıştır. Bununla birlikte, bu iki parametre arasında çok fazla etkene bağlı bir ilişki mevcuttur. Polimerizasyon büzülmesi- mikroboşluk oluşumu ilişkisinin daha fazla çalışma ile desteklenmesi gerekmektedir.

Polimerizasyon büzülmesi, RBC'lerde görülen, polimer-monomer dönüşümünün doğal bir sonucudur. Bulk-fill RBC'ler ise, düşük polimerizasyon büzülmesi gösterdiği öne sürülen, 2 mm'lik tabakalar halinde uygulanan geleneksel RBC'lerin aksine 4 mm ve üzeri uygulanan rezin kompozitlerdir. Kalın tabakalar halinde uygulanabilmeleri, hasta başında geçirilen sürenin azaltılmasını ve hasta-hekim konforunun artmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, en güncel rezin kompozit materyallerden olan altı farklı bulk fill rezin kompozit kullanılmıştır. Test ettiğimiz bulk-fill RBC'lerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi oranları, uygulanan ışık gücüne de bağlı olmakla birlikte %0,648-2,573 aralığındadır ve bu oranlar kabul edilebilir seviyededir. Her in vitro çalışmada olduğu gibi, bu çalışmada da bazı limitasyonlar mevcuttur. Her ne kadar çekilmiş insan dişinde yapılmış olsa da, ağız içi ekosistem tükürük, bakteri, gıda vb. gibi birçok faktörün bulunduğu komplike bir sistemdir ve bu sistemi taklit edebilmek oldukça zordur. Ayrıca mikro-CT oldukça hassas bir ölçüm cihazı olmasına rağmen, çözünürlüğünün yetersiz kaldığı alanlardaki hacimsel büzülmeleri hesaplayamamış olabilir. Bulk-fill rezin kompozitlerin performanslarının in vitro ve in vivo çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Bulk-fill rezin kompozitlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesi değişiminin bilgisayarlı mikro tomografi (mikro-CT) aracılığıyla incelendiği bu çalışmanın sınırlamaları dahilinde ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralabilir:

1. Çalışmada kullanılan bütün bulk fill rezin kompozitler birbirlerinden farklı hacimsel polimerizasyon büzülmesi ve mikroboşluk oranları sergilemiştir.
2. Yüksek ışık gücü ile polimerizasyon, düşük ışık gücü ile polimerizasyona kıyasla bütün bulk fill rezin kompozitlerde daha fazla hacimsel polimerizasyon büzülmesine neden olmuştur. Ancak sadece Sonic Fill 2 grubunda anlamlı seviyede bir artış gözlemlenmiştir ($p<0,05$).
3. Düşük ışık gücü ile polimerizasyon sonrası en yüksek hacimsel büzülme oranı Admira Fusion x-tra, en düşük oran ise Sonic Fill 2 grubuna aittir. Yüksek ışık gücü ile polimerizasyon sonrası en yüksek hacimsel büzülme oranı Sonic Fill 2, en düşük oran ise Filtek BulkFill grubunda tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Meereis CTW, Münchow EA, de Oliveira da Rosa WL, da Silva AF, Piva E. Polymerization shrinkage stress of resin-based dental materials: A systematic review and meta-analyses of composition strategies. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018;82:268-81.
2. 3M ESPE. Filtek Bulk Fill Posterior Restorative. Technical Product Profile.<http://multimedia.3m.com/mws/media/976634O/filtek-bulk-fill-posterior-restorative-technical-product-profile.pdf>. Accessed September 2017.
3. Dentsply. Surefil SDR Bulk Fill Flowable. Technical Product Profile.<http://www.dentaltown.com/Images/Dentaltown/magimages/0216/PPDpg60.pdf>. Accessed September 2017.
4. Bayne SC, Ferracane JL, Marshall GW, Marshall SJ, van Noort R. The Evolution of Dental Materials over the Past Century: Silver and Gold to Tooth Color and Beyond. *J Dent Res*. 2019;98(3):257-65.
5. Cook WD. Factors affecting the depth of cure of UV-polymerized composites. *J Dent Res*. 1980;59(5):800-8.
6. Zimmerli B, Strub M, Jeger F, Stadler O, Lussi A. Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*. 2010;120(11):972-86.
7. Dayangaç B. Kompozit rezin restorasyonlar: Güneş Kitabevi; 2000.
8. Ferracane JL, Greener EH. Fourier transform infrared analysis of degree of polymerization in unfilled resins--methods comparison. *J Dent Res*. 1984;63(8):1093-5.
9. Gajewski VE, Pfeifer CS, Fróes-Salgado NR, Boaro LC, Braga RR. Monomers used in resin composites: degree of conversion, mechanical properties and water sorption/solubility. *Braz Dent J*. 2012;23(5):508-14.
10. Hervas-Garcia A, Martinez-Lozano MA, Cabanes-Vila J, Barjau-Escribano A, Fos-Galve P. Composite resins. A review of the materials and clinical indications. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2006;11(2):E215-20.
11. Yuan H, Li M, Guo B, Gao Y, Liu H, Li J. Evaluation of Microtensile Bond Strength and Microleakage of a Self-adhering Flowable Composite. *J Adhes Dent*. 2015;17(6):535-43.
12. Cheng L, Zhang K, Weir MD, Melo MA, Zhou X, Xu HH. Nanotechnology strategies for antibacterial and remineralizing composites and adhesives to tackle dental caries. *Nanomedicine (Lond)*. 2015;10(4):627-41.
13. Fugolin APP, Pfeifer CS. New Resins for Dental Composites. *J Dent Res*. 2017;96(10):1085-91.

14. Rawls HR, Wellinghoff VT, Norling BK, Leamon SH, Swynnerton NF, Wellinghoff ST (1997). Low shrinkage resins from liquid crystal diacrylate monomers. *Polym Prepr* 38:167-168.
15. Nuyken O, Bohner R, Erdmann C (1996). Oxetane photopolymerization—a system with low volume shrinkage. *Macromol Symp* 107:125-138.
16. Stansbury JW. Cyclopolymerizable monomers for use in dental resin composites. *J Dent Res.* 1990;69(3):844-8.
17. Miyazaki K, Takata T, Endo T, Inanaga A. Thermal- and photo-polymerization of (meth) acrylates containing a spiro ortho ester moiety and the properties of poly[(meth)acrylate]s. *Dent Mater J.* 1994;13(1):9-18.
18. Moszner N, Volkel T, Fischer U, Rheinberger V (1999). Polymerization of cyclic monomers, 8. Synthesis and radical polymerization of hybrid 2-vinylcyclopropanes. *Macromol Rapid Commun* 20:33-35.
19. Soh MS, Yap AU, Sellinger A (2007a). Physicomechanical evaluation of low-shrinkage dental nanocomposites based on silsesquioxane cores. *Eur J Oral Sci* 115:230-238.
20. Lee KH, Rhee SH. The mechanical properties and bioactivity of poly(methyl methacrylate)/SiO₂-CaO nanocomposite. *Biomaterials.* 2009;30(20):3444-9.
21. Stansbury JW. Curing dental resins and composites by photopolymerization. *J Esthet Dent.* 2000;12(6):300-8.
22. Lee SY, Chiu CH, Boghosian A, Greener EH. Radiometric and spectroradiometric comparison of power outputs of five visible light-curing units. *J Dent.* 1993;21(6):373-7.
23. Park YJ, Chae KH, Rawls HR. Development of a new photoinitiation system for dental light-cure composite resins. *Dent Mater.* 1999;15(2):120-7.
24. Neumann MG, Miranda WG, Jr., Schmitt CC, Rueggeberg FA, Correa IC. Molar extinction coefficients and the photon absorption efficiency of dental photoinitiators and light curing units. *J Dent.* 2005;33(6):525-32.
25. Cramer NB, Stansbury JW, Bowman CN. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *J Dent Res.* 2011;90(4):402-16.
26. Chen MH. Update on dental nanocomposites. *J Dent Res.* 2010;89(6):549-60.
27. Tian M, Gao Y, Liu Y, Liao Y, Xu R, Hedin NE, et al. Bis-GMA/TEGDMA Dental Composites Reinforced with Electrospun Nylon 6 Nanocomposite Nanofibers Containing Highly Aligned Fibrillar Silicate Single Crystals. *Polymer (Guildf).* 2007;48(9):2720-8.
28. Garoushi S, Vallittu PK, Lassila LV. Depth of cure and surface microhardness of experimental short fiber-reinforced composite. *Acta Odontol Scand.* 2008;66(1):38-42.
29. Xia Y, Zhang F, Xie H, Gu N. Nanoparticle-reinforced resin-based dental composites. *J Dent.* 2008;36(6):450-5.

30. Xu HH, Weir MD, Sun L. Calcium and phosphate ion releasing composite: effect of pH on release and mechanical properties. *Dent Mater.* 2009;25(4):535-42.
31. Kaisarly D, Gezawi ME. Polymerization shrinkage assessment of dental resin composites: a literature review. *Odontology.* 2016;104(3):257-70.
32. Wilson, N. (2015) *Principles and Practice of Esthetic Dentistry: Essentials of Esthetic Dentistry.* Philadelphia, PA: Elsevier.
33. Ferracane JL. Buonocore Lecture. Placing dental composites--a stressful experience. *Oper Dent.* 2008;33(3):247-57.
34. Ferracane JL, Mitchem JC. Relationship between composite contraction stress and leakage in Class V cavities. *Am J Dent.* 2003;16(4):239-43.
35. Peskersoy C, Recen D, Kemaloğlu H. The effect of composite placement technique on the internal adaptation, gap formation and microshear bond strength. *Eur Oral Res.* 2022;56(1):10-6.
36. Moharam LM, El-Hoshy AZ, Abou-Elenein K. The effect of different insertion techniques on the depth of cure and vickers surface micro-hardness of two bulk-fill resin composite materials. *J Clin Exp Dent.* 2017;9(2):e266-e71.
37. Ferracane JL. Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dent Mater.* 2005;21(1):36-42.
38. Bausch JR, de Lange K, Davidson CL, Peters A, de Gee AJ. Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins. *J Prosthet Dent.* 1982;48(1):59-67.
39. Kim RJ, Kim YJ, Choi NS, Lee IB. Polymerization shrinkage, modulus, and shrinkage stress related to tooth-restoration interfacial debonding in bulk-fill composites. *J Dent.* 2015;43(4):430-9.
40. Soares CJ, Faria ESAL, Rodrigues MP, Vilela ABF, Pfeifer CS, Tantbirojn D, et al. Polymerization shrinkage stress of composite resins and resin cements - What do we need to know? *Braz Oral Res.* 2017;31(suppl 1):e62.
41. Versluis A, Douglas WH, Cross M, Sakaguchi RL. Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses? *J Dent Res.* 1996;75(3):871-8.
42. Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res.* 1987;66(11):1636-9.
43. Braga RR, Boaro LC, Kuroe T, Azevedo CL, Singer JM. Influence of cavity dimensions and their derivatives (volume and 'C' factor) on shrinkage stress development and microleakage of composite restorations. *Dent Mater.* 2006;22(9):818-23.
44. Silikas N, Eliades G, Watts DC. Light intensity effects on resin-composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dent Mater.* 2000;16(4):292-6.

45. Tauböck TT, Feilzer AJ, Buchalla W, Kleverlaan CJ, Krejci I, Attin T. Effect of modulated photo-activation on polymerization shrinkage behavior of dental restorative resin composites. *Eur J Oral Sci.* 2014;122(4):293-302.
46. Asmussen E, Peutzfeldt A. Influence of pulse-delay curing on softening of polymer structures. *J Dent Res.* 2001;80(6):1570-3.
47. Feng L, Suh BI. A mechanism on why slower polymerization of a dental composite produces lower contraction stress. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2006;78(1):63-9.
48. Lu H, Stansbury JW, Bowman CN. Impact of curing protocol on conversion and shrinkage stress. *J Dent Res.* 2005;84(9):822-6.
49. van Dijken JW, Pallesen U. A 7-year randomized prospective study of a one-step self-etching adhesive in non-carious cervical lesions. The effect of curing modes and restorative material. *J Dent.* 2012;40(12):1060-7.
50. Braga RR, Hilton TJ, Ferracane JL. Contraction stress of flowable composite materials and their efficacy as stress-relieving layers. *J Am Dent Assoc.* 2003;134(6):721-8.
51. Rosatto CM, Bicalho AA, Veríssimo C, Bragança GF, Rodrigues MP, Tantbirojn D, et al. Mechanical properties, shrinkage stress, cuspal strain and fracture resistance of molars restored with bulk-fill composites and incremental filling technique. *J Dent.* 2015;43(12):1519-28.
52. Park J, Chang J, Ferracane J, Lee IB. How should composite be layered to reduce shrinkage stress: incremental or bulk filling? *Dent Mater.* 2008;24(11):1501-5.
53. Bicalho AA, Pereira RD, Zanatta RF, Franco SD, Tantbirojn D, Versluis A, et al. Incremental filling technique and composite material--part I: cuspal deformation, bond strength, and physical properties. *Oper Dent.* 2014;39(2):E71-82.
54. Tardem C, Albuquerque EG, Lopes LS, Marins SS, Calazans FS, Poubel LA, et al. Clinical time and postoperative sensitivity after use of bulk-fill (syringe and capsule) vs. incremental filling composites: a randomized clinical trial. *Braz Oral Res.* 2019;33(0):e089.
55. Miletic V, Pongprueksa P, De Munck J, Brooks NR, Van Meerbeek B. Curing characteristics of flowable and sculptable bulk-fill composites. *Clin Oral Investig.* 2017;21(4):1201-12.
56. Al Sunbul H, Silikas N, Watts DC. Polymerization shrinkage kinetics and shrinkage-stress in dental resin-composites. *Dent Mater.* 2016;32(8):998-1006.
57. van Dijken JW, Pallesen U. A randomized controlled three year evaluation of "bulk-filled" posterior resin restorations based on stress decreasing resin technology. *Dent Mater.* 2014;30(9):e245-51.
58. van Dijken JW, Pallesen U. Posterior bulk-filled resin composite restorations: A 5-year randomized controlled clinical study. *J Dent.* 2016;51:29-35.

59. Chesterman J, Jowett A, Gallacher A, Nixon P. Bulk-fill resin-based composite restorative materials: a review. *Br Dent J.* 2017;222(5):337-44.
60. Menees TS, Lin CP, Kojic DD, Burgess JO, Lawson NC. Depth of cure of bulk fill composites with monowave and polywave curing lights. *Am J Dent.* 2015;28(6):357-61.
61. Shortall AC, Palin WM, Burtscher P. Refractive index mismatch and monomer reactivity influence composite curing depth. *J Dent Res.* 2008;87(1):84-8.
62. Fujita K, Ikemi T, Nishiyama N. Effects of particle size of silica filler on polymerization conversion in a light-curing resin composite. *Dent Mater.* 2011;27(11):1079-85.
63. Ilie N, Bucuta S, Draenert M. Bulk-fill resin-based composites: an in vitro assessment of their mechanical performance. *Oper Dent.* 2013;38(6):618-25.
64. Rueggeberg FA, Caughman WF, Curtis JW, Jr., Davis HC. Factors affecting cure at depths within light-activated resin composites. *Am J Dent.* 1993;6(2):91-5.
65. Prati C, Chersoni S, Montebugnoli L, Montanari G. Effect of air, dentin and resin-based composite thickness on light intensity reduction. *Am J Dent.* 1999;12(5):231-4.
66. Pelissier B, Jacquot B, Palin WM, Shortall AC. Three generations of LED lights and clinical implications for optimizing their use. 1: from past to present. *Dent Update.* 2011;38(10):660-2, 4-6, 8-70.
67. Tarle Z, Attin T, Marovic D, Andermatt L, Ristic M, Tauböck TT. Influence of irradiation time on subsurface degree of conversion and microhardness of high-viscosity bulk-fill resin composites. *Clin Oral Investig.* 2015;19(4):831-40.
68. Garcia D, Yaman P, Dennison J, Neiva G. Polymerization shrinkage and depth of cure of bulk fill flowable composite resins. *Oper Dent.* 2014;39(4):441-8.
69. Bucuta S, Ilie N. Light transmittance and micro-mechanical properties of bulk fill vs. conventional resin based composites. *Clin Oral Investig.* 2014;18(8):1991-2000.
70. El-Damanhoury H, Platt J. Polymerization shrinkage stress kinetics and related properties of bulk-fill resin composites. *Oper Dent.* 2014;39(4):374-82.
71. Isufi A, Plotino G, Grande NM, Ioppolo P, Testarelli L, Bedini R, et al. Fracture resistance of endodontically treated teeth restored with a bulkfill flowable material and a resin composite. *Ann Stomatol (Roma).* 2016;7(1-2):4-10.
72. Agarwal RS, Hiremath H, Agarwal J, Garg A. Evaluation of cervical marginal and internal adaptation using newer bulk fill composites: An in vitro study. *J Conserv Dent.* 2015;18(1):56-61.
73. Bahillo J, Bortolotto T, Roig M, Krejci I. Bulk filling of Class II cavities with a dual-cure composite: Effect of curing mode and enamel etching on marginal adaptation. *J Clin Exp Dent.* 2014;6(5):e502-8.

74. Furness A, Tadros MY, Looney SW, Rueggeberg FA. Effect of bulk/incremental fill on internal gap formation of bulk-fill composites. *J Dent*. 2014;42(4):439-49.
75. Leprince JG, Palin WM, Vanacker J, Sabbagh J, Devaux J, Leloup G. Physico-mechanical characteristics of commercially available bulk-fill composites. *J Dent*. 2014;42(8):993-1000.
76. Engelhardt F, Hahnel S, Preis V, Rosentritt M. Comparison of flowable bulk-fill and flowable resin-based composites: an in vitro analysis. *Clin Oral Investig*. 2016;20(8):2123-30.
77. Cantekin K, Gumus H. In vitro and clinical outcome of sandwich restorations with a bulk-fill flowable composite liner for pulpotomized primary teeth. *J Clin Pediatr Dent*. 2014;38(4):349-54.
78. DOI: 10.51122/neudentj.2021.6.
79. Ivanovas S, Hickel R, Ilie N. How to repair fillings made by silorane-based composites. *Clin Oral Investig*. 2011;15(6):915-22.
80. Paganini A, Attin T, Tauböck TT. Margin Integrity of Bulk-Fill Composite Restorations in Primary Teeth. *Materials (Basel)*. 2020;13(17).
81. Rizzante FAP, Duque JA, Duarte MAH, Mondelli RFL, Mendonça G, Ishikiriyama SK. Polymerization shrinkage, microhardness and depth of cure of bulk fill resin composites. *Dent Mater J*. 2019;38(3):403-10.
82. Wang R, Liu H, Wang Y. Different depth-related polymerization kinetics of dual-cure, bulk-fill composites. *Dent Mater*. 2019;35(8):1095-103.
83. Lohbauer U, Zinelis S, Rahiotis C, Petschelt A, Eliades G. The effect of resin composite pre-heating on monomer conversion and polymerization shrinkage. *Dent Mater*. 2009;25(4):514-9.
84. Yang J, Silikas N, Watts DC. Pre-heating effects on extrusion force, stickiness and packability of resin-based composite. *Dent Mater*. 2019;35(11):1594-602.
85. Polydorou O, König A, Hellwig E, Kümmerer K. Long-term release of monomers from modern dental-composite materials. *Eur J Oral Sci*. 2009;117(1):68-75.
86. Smith DL, Schoonover IC. Direct filling resins: dimensional changes resulting from polymerization shrinkage and water sorption. *J Am Dent Assoc*. 1953;46(5):540-4.
87. Rodríguez VI, Abate PF, Macchi RL. Immediate polymerization shrinkage in light cured restorative resins. *Acta Odontol Latinoam*. 2006;19(1):3-7.
88. Penn RW. A recording dilatometer for measuring polymerization shrinkage. *Dent Mater*. 1986;2(2):78-9.
89. Lai JH, Johnson AE. Measuring polymerization shrinkage of photo-activated restorative materials by a water-filled dilatometer. *Dent Mater*. 1993;9(2):139-43.

90. Yamamoto A, Miyazaki M, Rikuta A, Kurokawa H, Takamizawa T. Comparison of two methods for measuring the polymerization characteristics of flowable resin composites. *Dent Mater*. 2007;23(7):792-8.
91. Cook WD, Forrest M, Goodwin AA. A simple method for the measurement of polymerization shrinkage in dental composites. *Dent Mater*. 1999;15(6):447-9.
92. Lee IB, Cho BH, Son HH, Um CM. A new method to measure the polymerization shrinkage kinetics of light cured composites. *J Oral Rehabil*. 2005;32(4):304-14.
93. Naoum SJ, Ellakwa A, Morgan L, White K, Martin FE, Lee IB. Polymerization profile analysis of resin composite dental restorative materials in real time. *J Dent*. 2012;40(1):64-70.
94. Lee IB, Min SH, Seo DG. A new method to measure the polymerization shrinkage kinetics of composites using a particle tracking method with computer vision. *Dent Mater*. 2012;28(2):212-8.
95. Dunn PM. Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), the discovery of x rays and perinatal diagnosis. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2001;84(2):F138-9.
96. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *Br J Radiol*. 1973;46(552):1016-22.
97. Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfitt AM, Jesion G, Kleerekoper M. The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. *J Bone Miner Res*. 1989;4(1):3-11.
98. Guldberg RE, Ballock RT, Boyan BD, Duvall CL, Lin AS, Nagaraja S, et al. Analyzing bone, blood vessels, and biomaterials with microcomputed tomography. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2003;22(5):77-83.
99. Swain MV, Xue J. State of the art of Micro-CT applications in dental research. *Int J Oral Sci*. 2009;1(4):177-88.
100. Gantt DG, Kappleman J, Ketcham RA, Alder ME, Deahl TH. Three-dimensional reconstruction of enamel thickness and volume in humans and hominoids. *Eur J Oral Sci*. 2006;114 Suppl 1:360-4; discussion 75-6, 82-3.
101. Hirata R, Clozza E, Giannini M, Farrokhmanesh E, Janal M, Tovar N, et al. Shrinkage assessment of low shrinkage composites using micro-computed tomography. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2015;103(4):798-806.
102. Kim HJ, Park SH. Measurement of the internal adaptation of resin composites using micro-CT and its correlation with polymerization shrinkage. *Oper Dent*. 2014;39(2):E57-70.
103. Demirel G, Baltacıoğlu İH, Kolsuz ME, Ocak M, Orhan K. Micro-computed tomography evaluation of internal void formation of bulk-fill resin composites in Class II restorations. *Polymer Composites*. 2019;40(8):2984-92.

104. Moll K, Fritzenschaft A, Haller B. In vitro comparison of dentin bonding systems: effect of testing method and operator. *Quintessence Int.* 2004;35(10):845-52.
105. Van Meerbeek B, Peumans M, Poitevin A, Mine A, Van Ende A, Neves A, et al. Relationship between bond-strength tests and clinical outcomes. *Dent Mater.* 2010;26(2):e100-21.
106. Sumitani Y, Hamba H, Nakamura K, Sadr A, Nikaido T, Tagami J. Micro-CT assessment of comparative radiopacity of adhesive/composite materials in a cylindrical cavity. *Dent Mater J.* 2018;37(4):634-41.
107. Yassen GH, Platt JA, Hara AT. Bovine teeth as substitute for human teeth in dental research: a review of literature. *J Oral Sci.* 2011;53(3):273-82.
108. ISO I. TS 11405: Dental materials—testing of adhesion to tooth structure. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization ISO Central Secretariat 2003.
109. Hanabusa M, Mine A, Kuboki T, Momoi Y, Van Ende A, Van Meerbeek B, et al. Bonding effectiveness of a new 'multi-mode' adhesive to enamel and dentine. *J Dent.* 2012;40(6):475-84.
110. Perdigão J, Sezinando A, Monteiro PC. Laboratory bonding ability of a multi-purpose dentin adhesive. *Am J Dent.* 2012;25(3):153-8.
111. Erickson RL, Barkmeier WW, Kimmes NS. Bond strength of self-etch adhesives to pre-etched enamel. *Dent Mater.* 2009;25(10):1187-94.
112. Rotta M, Bresciani P, Moura SK, Grande RH, Hilgert LA, Baratieri LN, et al. Effects of phosphoric acid pretreatment and substitution of bonding resin on bonding effectiveness of self-etching systems to enamel. *J Adhes Dent.* 2007;9(6):537-45.
113. Szesz A, Parreiras S, Reis A, Loguercio A. Selective enamel etching in cervical lesions for self-etch adhesives: A systematic review and meta-analysis. *J Dent.* 2016;53:1-11.
114. de Goes MF, Shinohara MS, Freitas MS. Performance of a new one-step multi-mode adhesive on etched vs non-etched enamel on bond strength and interfacial morphology. *J Adhes Dent.* 2014;16(3):243-50.
115. Ilie N, Hilton TJ, Heintze SD, Hickel R, Watts DC, Silikas N, et al. Academy of Dental Materials guidance-Resin composites: Part I-Mechanical properties. *Dent Mater.* 2017;33(8):880-94.
116. Sokolowski G, Szczesio A, Bociong K, Kaluzinska K, Lapinska B, Sokolowski J, et al. Dental Resin Cements-The Influence of Water Sorption on Contraction Stress Changes and Hydroscopic Expansion. *Materials (Basel).* 2018;11(6).
117. Walls AW, McCabe JF, Murray JJ. The polymerization contraction of visible-light activated composite resins. *J Dent.* 1988;16(4):177-81.

118. Patel MP, Braden M, Davy KW. Polymerization shrinkage of methacrylate esters. *Biomaterials*. 1987;8(1):53-6.
119. Fok ASL, Aregawi WA. The two sides of the C-factor. *Dent Mater*. 2018;34(4):649-56.
120. Truffier-Boutry D, Demoustier-Champagne S, Devaux J, Biebuyck JJ, Mestdagh M, Larbanois P, et al. A physico-chemical explanation of the post-polymerization shrinkage in dental resins. *Dent Mater*. 2006;22(5):405-12.
121. Giachetti L, Scaminaci Russo D, Bambi C, Grandini R. A review of polymerization shrinkage stress: current techniques for posterior direct resin restorations. *J Contemp Dent Pract*. 2006;7(4):79-88.
122. Sampaio CS, Chiu KJ, Farrokhmanesh E, Janal M, Puppini-Rontani RM, Giannini M, et al. Microcomputed Tomography Evaluation of Polymerization Shrinkage of Class I Flowable Resin Composite Restorations. *Oper Dent*. 2017;42(1):E16-e23.
123. Boca C, Truyen B, Henin L, Schulte AG, Stachniss V, De Clerck N, et al. Comparison of micro-CT imaging and histology for approximal caries detection. *Sci Rep*. 2017;7(1):6680.
124. Ghavami-Lahiji M, Davaloo RT, Tajziehchi G, Shams P. Micro-computed tomography in preventive and restorative dental research: A review. *Imaging Sci Dent*. 2021;51(4):341-50.
125. Kim I, Paik KS, Lee SP. Quantitative evaluation of the accuracy of micro-computed tomography in tooth measurement. *Clin Anat*. 2007;20(1):27-34.
126. Sun J, Lin-Gibson S. X-ray microcomputed tomography for measuring polymerization shrinkage of polymeric dental composites. *Dent Mater*. 2008;24(2):228-34.
127. Sampaio CS, Fernández Arias J, Atria PJ, Cáceres E, Pardo Díaz C, Freitas AZ, et al. Volumetric polymerization shrinkage and its comparison to internal adaptation in bulk fill and conventional composites: A μ CT and OCT in vitro analysis. *Dent Mater*. 2019;35(11):1568-75.
128. Fronza BM, Makishi P, Sadr A, Shimada Y, Sumi Y, Tagami J, et al. Evaluation of bulk-fill systems: microtensile bond strength and non-destructive imaging of marginal adaptation. *Braz Oral Res*. 2018;32:e80.
129. Prager M, Pierce M, Atria PJ, Sampaio C, Cáceres E, Wolff M, et al. Assessment of cuspal deflection and volumetric shrinkage of different bulk fill composites using non-contact phase microscopy and micro-computed tomography. *Dent Mater J*. 2018;37(3):393-9.
130. Gonçalves F, Azevedo CL, Ferracane JL, Braga RR. BisGMA/TEGDMA ratio and filler content effects on shrinkage stress. *Dent Mater*. 2011;27(6):520-6.

131. Lee MR, Cho BH, Son HH, Um CM, Lee IB. Influence of cavity dimension and restoration methods on the cusp deflection of premolars in composite restoration. *Dent Mater.* 2007;23(3):288-95.
132. Almeida Junior L, Lula ECO, Penha KJS, Correia VS, Magalhães FAC, Lima DM, et al. Polymerization Shrinkage of Bulk Fill Composites and its Correlation with Bond Strength. *Braz Dent J.* 2018;29(3):261-7.
133. Grenier JS. Long-term Volumetric Analysis of Composites Resins Stored in PBS. Uniformed Services University of the Health Sciences, Air Force Postgraduate ...; 2019.
134. Al-Ahdal K, Ilie N, Silikas N, Watts DC. Polymerization kinetics and impact of post polymerization on the Degree of Conversion of bulk-fill resin-composite at clinically relevant depth. *Dent Mater.* 2015;31(10):1207-13.
135. Bilgili Can D, Özarslan M. Evaluation of color stability and microhardness of contemporary bulk-fill composite resins with different polymerization properties. *J Esthet Restor Dent.* 2022.
136. Jager S, Balthazard R, Dahoun A, Mortier E. Filler Content, Surface Microhardness, and Rheological Properties of Various Flowable Resin Composites. *Oper Dent.* 2016;41(6):655-65.
137. Fano V, Ortalli I, Pozela K. Porosity in composite resins. *Biomaterials.* 1995;16(17):1291-5.
138. Opdam NJ, Roeters JJ, de Boer T, Pesschier D, Bronkhorst E. Voids and porosities in class I micropreparations filled with various resin composites. *Oper Dent.* 2003;28(1):9-14.
139. Demirel G, Orhan AI, Irmak Ö, Aydin F, Buyuksungur A, Bilecenoğlu B, et al. Micro-computed tomographic evaluation of the effects of pre-heating and sonic delivery on the internal void formation of bulk-fill composites. *Dent Mater J.* 2021;40(2):525-31.
140. de Mendonça BC, de Cássia Romano B, Sebold M, Fronza BM, Braga RR, Nima G, et al. Polymerization shrinkage stress, internal adaptation, and dentin bond strength of bulk-fill restorative materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 2021;111:102964.
141. Aggarwal N, Jain A, Gupta H, Abrol A, Singh C, Rapgay T. The comparative evaluation of depth of cure of bulk-fill composites - An in vitro study. *J Conserv Dent.* 2019;22(4):371-5.
142. Balthazard R, Jager S, Dahoun A, Gerdolle D, Engels-Deutsch M, Mortier E. High-resolution tomography study of the porosity of three restorative resin composites. *Clin Oral Investig.* 2014;18(6):1613-8.
143. Comba A, Baldi A, Tempesta RM, Vergano EA, Alovise M, Pasqualini D, et al. Influence of Curing Mode and Layering Technique on the 3D Interfacial Gap of Bulk-fill

Resin Composites in Deep Class-I Restorations: A Micro-CT Volumetric Study. *The Journal of Adhesive Dentistry*. 2021;23(5):421-8.

144. Ibrahim HA, Shalaby ME, Abdalla AI. Marginal fit of class II cavities restored with bulk-fill composites. *Tanta Dental Journal*. 2018;15(1):1.

145. Besegato JF, Jussiani EI, Andrello AC, Fernandes RV, Salomão FM, Vicentin BLS, et al. Effect of light-curing protocols on the mechanical behavior of bulk-fill resin composites. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2019;90:381-7.

146. Burgess JO, DeGoes M, Walker R, Ripps AH. An evaluation of four light-curing units comparing soft and hard curing. *Pract Periodontics Aesthet Dent*. 1999;11(1):125-32; quiz 34.

147. Malhotra N, Mala K. Light-curing considerations for resin-based composite materials: a review. Part I. *Compend Contin Educ Dent*. 2010;31(7):498-505; quiz 6, 8.

148. Braga RR, Ballester RY, Ferracane JL. Factors involved in the development of polymerization shrinkage stress in resin-composites: a systematic review. *Dent Mater*. 2005;21(10):962-70.

149. Bin Nooh AN, Nahedh HA, AlRefeai M, Alkhudhairy F. The Effect of Irradiance on the Degree of Conversion and Volumetric Polymerization Shrinkage of Different Bulk-Fill Resin-Based Composites: An In Vitro Study. *Eur J Dent*. 2021;15(2):312-9.

150. Almeida LJ, Penha KJS, Souza AF, Lula ECO, Magalhães FC, Lima DM, et al. Is there correlation between polymerization shrinkage, gap formation, and void in bulk fill composites? A μ CT study. *Braz Oral Res*. 2017;31:e100.

151. Bowen RL. Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues. VI. Forces developing in direct-filling materials during hardening. *J Am Dent Assoc*. 1967;74(3):439-45.