ORİJİNAL ARAŞTIRMA ORIGINAL RESEARCH

DOI: 10.5336/dentalsci.2026-117396

Üretici Tarafından Önerilen Protokollere Göre Polimerize Edilen Bulk-Fill Kompozitlerin Dentin Makaslama Bağlanma Dayanımı ve Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi: *İn Vitro* Çalışma

Evaluation of Dentin Shear Bond Strength and Flexural Strength of Bulk-Fill Composites Polymerized According to Manufacturer-Recommended Protocols: *In Vitro* Study

Merve ŞAHİN[a], Emine KITIN[b], Ezgi ERDEN KAYALIDERE[a], Esra SİLAHTAR[c], Ümit Begüm GÜRAY EFES[d]

[a]İstanbul Kent Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, İstanbul, Türkiye
[b]İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, İstanbul, Türkiye
[c]Serbest Diş Hekimi, İstanbul, Türkiye
[d]İstanbul Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, İstanbul, Türkiye

ÖZET Amaç: Bu çalışmanın amacı, üretici talimatlarına uygun polimerizasyon koşulları altında bir geleneksel ve beş bulk-fill rezin kompozitin dentin makaslama bağlanma dayanımını [shear bond strength (SBS)], üç nokta eğilme dayanımını [flexural strength (FS)] ve kırılma tipi dağılımlarını; standart bir polimerizasyon rejimi yerine, her bir materyal için üretici tarafından önerilen spesifik protokoller altında değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. **Gereç ve Yöntemler:** Çalışmada yer alan tüm materyaller, üretici talimatlarına uygun olarak farklı ışık şiddeti (1.200-3.000 mW/cm²) ve süre (3-30 sn) kombinasyonları kullanılarak polimerize edilmiştir. SBS (n=10/grup) insan molar dişleri üzerinde ölçülmüş ve kırılma tipleri adeziv/koheziv/miks olarak sınıflandırılmıştır. FS, 2×2×25 mm boyutlarında çubuk örnekler üzerinde ISO 4049'a göre test edilmiştir. SBS ve FS verileri Kruskal-Wallis testi, ardından Bonferroni düzeltmeli ikili karşılaştırmalar ile analiz edilmiştir (α=0,05). Kırılma tipi dağılımları ki-kare testi ile karşılaştırılmıştır. **Bulgular:** SBS açısından genel olarak anlamlı fark saptanmıştır. Tetric PowerFlow ve SonicFill 3; Tetric PowerFill, Opus Bulk Fill Flow ve IPS Empress Direct'e kıyasla anlamlı derecede daha düşük SBS göstermiş; ancak Opus Bulk Fill'den ve birbirlerinden farklı bulunmamıştır. Kırılma tipi dağılımları gruplar arasında anlamlı farklılık göstermemiştir; SonicFill 3'te adeziv kırılmaların beklenenden fazla olduğu gözlenmiştir. FS açısından genel fark anlamlıdır; IPS Empress Direct ve Opus Bulk Fill Flow; Opus Bulk Fill, Tetric PowerFlow, SonicFill 3 ve Tetric PowerFill'e kıyasla anlamlı derecede daha düşük FS değerleri sergilemiştir. **Sonuç:** Üretici talimatlarına uygun polimerizasyon altında SBS ve FS değerleri materyale bağlıdır; kırılma tipi paternleri SBS sonuçlarının yorumlanmasına katkı sağlamakla birlikte materyaller arasında farklılık göstermemiştir.

Anahtar Kelimeler: Bileşik rezinler; kayma mukavemeti; eğilme dayanımı

ABSTRACT Objective: The aim of this study was to evaluate and compare the dentin shear bond strength (SBS), flexural strength (FS), and failure mode distributions of one conventional and five bulk-fill resin composites specifically under their respective manufacturer-recommended polymerization protocols, rather than a standardized curing regime. **Material and Methods:** All specimens were polymerized using specific light-curing protocols (light intensity: 1,200-3,000 mW/cm²; time: 3-30 s) as recommended by the manufacturers. SBS (n=10/group) was measured on human molars and failure modes were classified as adhesive/cohesive/mixed. FS was tested on 2×2×25 mm bar-shaped specimens according to ISO 4049. SBS and FS data were analyzed using the Kruskal-Wallis test, followed by Bonferroni-adjusted pairwise comparisons (α=0.05). Failure mode distributions were compared by χ^2 with Cramér's V and standardized residuals. **Results:** Statistically significant differences were found in SBS. Tetric PowerFlow and SonicFill 3 showed significantly lower SBS than Tetric PowerFill, Opus Bulk Fill Flow, and IPS Empress Direct ($p<0.05$), but did not differ from Opus Bulk Fill or from each other. Failure mode distributions did not differ significantly, though SonicFill 3 showed more adhesive failures than expected. Regarding FS, the overall difference was significant; IPS Empress Direct and Opus Bulk Fill Flow exhibited significantly lower values than Opus Bulk Fill, Tetric PowerFlow, SonicFill 3, and Tetric PowerFill ($p<0.05$). **Conclusion:** Under manufacturer-specified curing, SBS and FS were material-dependent; failure-mode patterns contextualized SBS but did not differ among materials.

Keywords: Composite resins; shear strength; flexural strength

KAYNAK GÖSTERMEK İÇİN:
Şahin M, Kıtın E, Erden Kayalıdere E, Silahtar E, Güray Efes ÜB. Üretici tarafından önerilen protokollere göre polimerize edilen bulk-fill kompozitlerin dentin makaslama bağlanma dayanımı ve eğilme dayanımının değerlendirilmesi: *İn vitro* çalışma. Turkiye Klinikleri J Dental Sci. 2026;32(4):1210-21.

Correspondence: Ezgi ERDEN KAYALIDERE
İstanbul Kent Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, İstanbul, Türkiye
E-mail: ezgi.kayalidere@kent.edu.tr

Peer review under responsibility of Turkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences.

Received: 08 Jan 2026 ***Received in revised form:*** 05 Jun 2026 ***Accepted:*** 16 Jun 2026 ***Available online:*** 06 Oct 2026

2146-8966 / Copyright © 2026 by Türkiye Klinikleri. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Direkt rezin kompozit restorasyonlar, fonksiyonu yeniden sağlayabilmeleri ve hastaların estetik beklentilerini karşılayabilmeleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.[1] Bununla birlikte polimerizasyon büzülmesi (≈%2-6) ve buna bağlı gerilmeler arayüz bağlanma dayanımını aşarak marjinal bütünlüğü olumsuz etkileyebilir ve postoperatif hassasiyet ile sekonder çürük oluşumuna yol açabilir.[2] Büzülmeye bağlı gerilmeleri azaltmak ve yeterli polimerizasyonu sağlamak amacıyla geleneksel tabakalama tekniği 2 mm'den daha kalın olmayan tabakaların ışıkla polimerize edilmesini önermektedir; ancak bu yaklaşım teknik hassasiyet gerektirmesi, zaman alıcı olması ve artımlar arasında boşluk oluşumuna yatkınlığı nedeniyle dezavantajlıdır.[3]

Bulk-fill kompozitler, kabul edilebilir özellikleri korurken yerleştirme işlemini basitleştirmek amacıyla geliştirilmiş olup, 4-5 mm kalınlığındaki tek tabakaların uygulanmasına olanak tanıyarak klinik süreyi ve tekniğe duyarlılığı azaltmaktadır.[4] Güncel bulk-fill formülasyonlar, viskozite (akışkan ve yüksek viskoziteli) ile matriks ve fotobaşlatıcı sistemleri açısından farklılık göstermektedir. Son dönem ürün gruplarında ayrıca daha derin tabakalarda yeterli polimerizasyon derecesi elde etmeyi amaçlayan ve ışınlama sürelerini kısaltan yüksek ışık şiddetli polimerizasyon seçenekleri (örneğin hızlı, yüksek yoğunluklu veya "3 sn'lik" protokoller) materyallerle birlikte sunulmaktadır.[5-9]

Bulk-fill kompozitlerde polimerizasyon stresini ve mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla geliştirilen AFCT (Addition Fragmentation Chain Transfer), APS (Advanced Polymerization System) ve sonik aktivasyon gibi teknolojiler, klinik uygulama sürelerini kısaltma potansiyeli sunmaktadır.[10-12] Literatürde, bazı bulk-fill materyallerin hem makaslama bağlanma dayanımı [shear bond strength (SBS)] hem de eğilme dayanımları [flexural strength (FS)] ayrı ayrı veya birlikte raporlanmış olsa da bu iki özelliğin aynı deneysel tasarımda bir arada değerlendirilmesi, materyalin klinik başarısını belirleyen iki kritik sütunu -arayüz bütünlüğü ve yapısal direnç- eş zamanlı olarak analiz etme imkanı tanır. Özellikle yeni nesil fotobaşlatıcılar ve stres azaltıcı monomerlerin, üreticiye özgü "ultra-hızlı" (3 sn gibi) protokoller altında hem adeziv arayüzdeki (SBS) hem de kütlesel yapıdaki (FS) başarısını doğrudan karşılaştıran kapsamlı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler, materyalin sadece mekanik gücünü değil, bu gücün adeziv stabiliteyle ne kadar uyumlu olduğunu anlamak açısından kritiktir. Mevcut literatürde bulk-fill kompozitler genellikle standart ışınlama süreleri altında karşılaştırılsa da, her materyalin kendi kimyasal yapısına özgü (yeni nesil fotobaşlatıcılar veya stres azaltıcı monomerler gibi) geliştirilmiş olan spesifik polimerizasyon protokollerinin -özellikle ultra-hızlı yüksek ışık şiddeti seçeneklerinin- eş zamanlı olarak hem bağlanma hem de eğilme performansı üzerindeki etkisi henüz tam olarak aydınlatılmamıştır. Bu çalışma, farklı viskozite ve teknolojik altyapıya sahip bulk-fill sistemlerin, doğrudan üreticiye özgü polimerizasyon protokolleri altında sergiledikleri performansın eş zamanlı olarak değerlendirilmesi bakımından literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışmanın hipotezleri, test edilen parametreler doğrultusunda şu şekilde kurgulanmıştır: İlk sıfır hipotezi ($H0_1$), üreticilerin önerdiği özel polimerizasyon protokolleri (farklı ışık şiddeti ve süreleri) altında uygulanan bulk-fill kompozitlerin dentin bağlanma dayanımları (SBS) arasında fark olmadığı; ikinci sıfır hipotezi ($H0_2$) ise yine bu spesifik protokollere göre hazırlanan gruplar arasında FS açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığıdır.

GEREÇ VE YÖNTEMLER

ETİK ONAY VE MATERYALLER

Bu *in vitro* çalışma, İstanbul Kent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu tarafından onaylanmıştır (tarih: 5 Nisan 2024; no: E-10420511-050-31770). Araştırma, Helsinki Deklarasyonu ilkelerine uygun olarak yürütülmüş olup, kullanılan çekilmiş dişlerin sahiplerinden çalışma hakkında bilgilendirilmiş onam alınmıştır. Çalışma kapsamında bir geleneksel ve beş farklı bulk-fill rezin kompozit materyali test edilmiştir. Kullanılan materyallerin ticari isimleri, içerikleri, viskoziteleri, lot numaraları ve üretici tarafından önerilen polimerizasyon protokollerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 1'de sunulmaktadır.

TABLO 1: Çalışmada kullanılan rezin kompozitler: İçerik ve üretici tarafından önerilen ışıkla polimerizasyon protokolleri

Marka (materyal)	Üretici (şehir, ülke)	Renk	Bileşim ve doldurucu içeriği	İnorganik içerik	Viskozite/tip	Tabaka kalınlığı	Işık şiddeti (mW/cm²)	Süre (sn)	Radyan maruziyet (J/cm²)	Işık cihazı/modu	Lot No.
IPS Empress Direct	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	A2 Mine	Baryum camı, itterbiyum triflorür, karışık oksitler; silikon dioksit ve kopolimer; dimetakrilatlar; katkı maddeleri/başlatıcılar/stabilizatörler/pigmentler	**%75-79 ağırlıkça** veya **%52-59 hacimce**	Pasta (konvansiyonel)	**2×2 mm** (her tabaka ayrı kürlenmiştir)	**1.200**	**Her tabaka için 10**	**Her tabaka için 12**	Bluephase Power-Cure-High Power	M26421
SonicFill 3	Kerr Corp., Orange, CA, ABD	A2	Karışık oksitler, baryum camı, silika, itterbiyum triflorür; Bis-EMA, Bis-GMA, TEGDMA	**≈ %81,5 ağırlıkça** veya **%65,9 hacimce**	Pasta (sonik aktive edilen bulk-fill)	**Tek tabaka 4 mm**	**1.200**	**Her tabaka için 10**	**Her tabaka için 12**	Bluephase Power-Cure-High Power	9082469
Tetric PowerFill	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	IVA	Baryum camı, itterbiyum triflorür, karışık oksitler, kopolimerler; dimetakrilatlar; katkı maddeleri/başlatıcılar/stabilizatörler/pigmentler	**%76-77 ağırlıkça** veya **%53-54 hacimce**	Pasta (bulk-fill)	**Tek tabaka 4 mm**	**3.000**	**Her tabaka için 3**	**Her tabaka için 9**	Bluephase Power-Cure-3sCure	Z01V5V
Tetric PowerFlow	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	IVA	Baryum camı, itterbiyum triflorür, kopolimerler; dimetakrilatlar; katkı maddeleri/başlatıcılar/stabilizatörler/pigmentler	**%68,2 ağırlıkça** veya **%46,4 hacimce**	Akışkan (bulk-fill)	**Tek tabaka 4 mm**	**3.000**	**Her tabaka için 3**	**Her tabaka için 9**	Bluephase Power-Cure-3sCure	Z01V5V
Opus Bulk Fill APS	FGM, Joinville, SC, Brezilya	A2	Silikon dioksit (silika), stabilizatörler/pigmentler; üretan dimetakrilat monomerleri; yardımcı başlatıcı, foto-başlatıcı, stabilizatörler	**%79 ağırlıkça** (üretici verisi)	Pasta (bulk-fill)	**Tek tabaka 4 mm**	**1.200**	**Her tabaka için 30**	**Her tabaka için 36**	Bluephase Power-Cure-High Power	060323
Opus Bulk Fill Flow APS	FGM, Joinville, SC, Brezilya	A2	Silikon dioksit (silika), stabilizatörler/pigmentler; üretan dimetakrilat monomerleri; yardımcı başlatıcı, foto-başlatıcı, stabilizatörler	**%68 ağırlıkça** (üretici verisi)	Akışkan (bulk-fill)	**Tek tabaka 4 mm**	**1.200**	**Her tabaka için 20**	**Her tabaka için 24**	Bluephase Power-Cure-High Power	270422

Radyan maruziyet, ışık şiddeti (mW/cm²)×süre (sn)÷1000 formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Bileşim ve doldurucu içerikleri, üretici firmaların teknik veri formlarında beyan edildiği şekliyle verilmiştir. Kısaltmalar (rezin matriks ve katkı maddeleri): Bis-GMA: Bisfenol A diglisidil dimetakrilat; Bis-EMA: Etoksile bisfenol A dimetakrilat; UDMA: Üretan dimetakrilat; TEGDMA: Trietilen glikol dimetakrilat; AUDMA: Aromatik üretan dimetakrilat; AFM: İlave-fragmentasyon monomeri; CQ: Kamforkinon; Ivocerin®: Germanyum bazlı foto-başlatıcı (bis(4-metoksibenzoil)dietilgermanyum); EDMAB: Etil-4-dimetilaminobenzoat (amin yardımcı başlatıcı). Doldurucu terimleri: YbF_3: İtterbiyum triflorür; Ba-glass: Baryum camı; SiO_2: Silika; "Karışık oksitler/kopolimer" ifadesi üretici beyanına dayanmaktadır.

ÖRNEKLEM BÜYÜKLÜĞÜ HESAPLAMASI

Çalışmanın örneklem büyüklüğü, literatürdeki önceki çalışmalardan elde edilen veriler temel alınarak G*Power 3.1.9.7 yazılımıyla (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Almanya) hesaplanmıştır.[13,14] Bu doğrultuda, *F*-testleri ailesinden "varyans analizi: Sabit etkiler, omnibus, tek yönlü" (Fixed effects, omnibus, one-way analysis of variance) yöntemi kullanılarak yapılan analizde, altı grup arasında yapılacak karşılaştırma için; etki büyüklüğü (*f*)=0,50, güç=%80 ve α=0,05 parametreleri temel alındığında, toplamda 60 (grup başına *n*=10) örneğin yeterli olduğu belirlenmiştir.

DENTİNE MAKASLAMA BAĞLANMA DAYANIMI

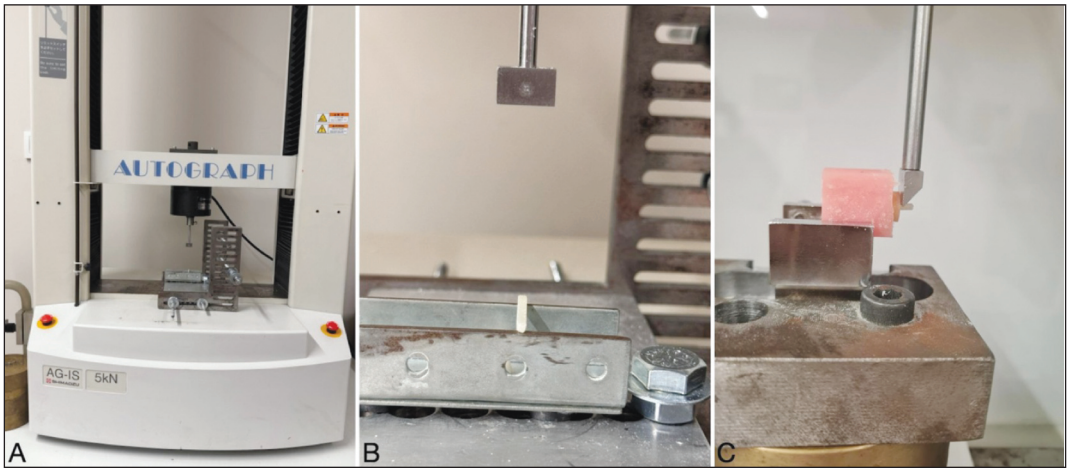
Altmış adet çürüksüz insan molar dişi temizlenmiş ve %0,1 timol solüsyonunda, 4 °C'de ve karanlık ortamda 7 gün süreyle saklanmıştır. Dişler, mine-sement birleşiminin 1 mm altına kadar otopolimerizan akrilik rezin içine gömülmüştür. Okluzal mine, hassas kesme cihazı (Isomet Low Speed Saw 1000; Buehler, Lake Bluff, IL, ABD) kullanılarak mine-dentin sınırının 1 mm altından uzaklaştırılmış; dentin yüzeyleri ise su altında 600 grit silikon karbid (SiC) zımpara ile 60 sn süreyle standartlaştırılmıştır. Örnekler rastgele 6 gruba ayrılmıştır (n=10). Universal bir adeziv (Adhese Universal VivaPen; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), üretici talimatlarına uygun olarak uygulanmış (20 sn aktif uygulama, hafif hava ile inceltme) ve LED ışık cihazı (Bluephase PowerCure; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ile 3.000 mW/cm² ışık şiddetinde 3 sn polimerize edilmiştir. Silindirik kompozit yapılar (çap 2 mm×yükseklik 4 mm), Teflon kalıp içeren Ultradent jig sistemi (Ultradent Products, Inc., South Jordan, UT, ABD) kullanılarak hazırlanmıştır.

Her bir kompozitin polimerizasyonu, çalışma tasarımında kullanılan ve üretici tarafından önerilen protokollere göre gerçekleştirilmiştir: IPS Empress Direct (2 mm kalınlıkta iki tabaka; her biri 1.200 mW/cm²'de 10 sn), SonicFill 3 (tek 4 mm tabaka; 1.200 mW/cm²'de 10 sn), Tetric PowerFill (tek 4 mm tabaka; 3.000 mW/cm²'de 3 sn), Tetric PowerFlow (tek 4 mm tabaka; 3.000 mW/cm²'de 3 sn), Opus Bulk Fill (tek 4 mm tabaka; 1.200 mW/cm²'de 30 sn) ve Opus Bulk Fill Flow (tek 4 mm tabaka; 1.200 mW/cm²'de 20 sn). Karşılık gelen nominal radyan maruziyet değerleri (ışık şiddeti×süre) şu şekildedir: IPS Empress Direct için her bir 2 mm tabaka başına 12 J/cm², SonicFill 3 için 12 J/cm², Tetric PowerFill için 9 J/cm², Tetric PowerFlow için 9 J/cm², Opus Bulk Fill için 36 J/cm² ve Opus Bulk Fill Flow için 24 J/cm². Işık cihazının (Bluephase PowerCure) radyan çıkışı, her deney grubuna başlamadan önce cihazın şarj ünitesinde yer alan dahili radyometre kullanılarak doğrulanmıştır. Cihaz ucundaki ışık şiddeti değerinin, üretici tarafından belirtilen nominal değerlerle (1.200 mW/cm² ve 3.000 mW/cm²) tutarlılığı her on örnekte bir kontrol edilerek enerji iletiminde standardizasyon sağlanmıştır. 3 sn'lik polimerizasyon protokolü, cihazın "3sCure" modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modda cihaz, kararlı bir 3.000 mW/cm² (±%10) ışık şiddeti değerini kesintisiz olarak iletmek üzere programlanmıştır. Işık ucu, polimerizasyon sırasında örneğe 0 mm mesafede ve dik açıyla (90°) sabitlenmiştir.

Tüm SBS testleri evrensel test cihazında (Autograph AG-IS; Shimadzu, Kyoto, Japonya) gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğine genel bakış Resim 1'de sunulmaktadır. Örnekler testten önce 37 °C'de distile suda 24 saat bekletilmiştir. SBS ölçümü, bağlanma arayüzüne 90° açıyla yerleştirilen keski uçlu aparat kullanılarak 0,5 mm/dk hızda kırılma oluşana kadar yapılmıştır. SBS değerleri (MPa), kırılma yükünün (N) bağlanma alanına (mm²) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Kırılma tipleri, stereomikroskop altında (Olympus SZ61; Olympus Corporation, Tokyo, Japonya) 25× büyütmede değerlendirilmiş ve adeziv, koheziv veya miks olarak sınıflandırılmıştır. Temsili örnekler, arayüz özelliklerini göstermek amacıyla taramalı elektron mikroskobu [scanning electron microscope (SEM)] ile görüntülenmiş; SEM değerlendirmesi tanımlayıcı/illüstratif olup nicel karşılaştırma amacı taşımamıştır.

EĞİLME DAYANIMI-ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

Her materyal için ISO 4049 standardına ve üretici talimatlarına uygun olarak Teflon kalıplar kullanılarak 2×2×25 mm boyutlarında 10 adet çubuk örnek hazırlanmıştır.[15] Yüzeyler 800 ve 1.000 grit SiC zımpara ile düzeltilmiş, örnek boyutları dijital kumpas (Digimatic caliper, Mitutoyo Corp., Tokyo, Japonya) ile



RESİM 1: Bu çalışmada kullanılan mekanik test düzenekleri
A) Evrensel test cihazı (5 kN yük); **B)** 2×2×25 mm boyutlarındaki çubuk örneklerin eğilme dayanımı testinde kullanılan, 20 mm destek aralığına sahip üç nokta eğme aparatı (çapraz kafa hızı: 1 mm/dk); **C)** Makaslama bağlanma dayanımı düzeneği: gömülü dişler üzerinde dentin-kompozit arayüzüne 90° açıyla uygulanan keski uçlu aparat (0,5 mm/dk).

doğrulanmış ve test öncesinde 37 °C'de distile suda 24 saat saklanmıştır. Testler, 20 mm destek aralığı ve 1 mm/dk çapraz kafa hızı kullanılarak evrensel test cihazında (Autograph AG-IS, Shimadzu, Japonya) gerçekleştirilmiş; yük uygulama ucu 2 mm çapına sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. FS (MPa), $\sigma=3F\ L/(2\ b\ h^2)$ formülü ile hesaplanmıştır; burada F maksimum yük (N), L destek aralığı (mm), b genişlik (mm) ve h kalınlığı (mm) ifade etmektedir.

TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU

Kırılma morfolojilerini örneklemek amacıyla her kırılma tipi için bir adet SBS örneği ultrasonik banyoda (15 dk, deiyonize su) temizlenmiş ve SEM (Versa 3D; FEI Company, Hillsboro, OR, ABD; 3,0 kV; yaklaşık 70-300× büyütme) ile incelenmiştir.

İSTATİSTİKSEL ANALİZ

İstatistiksel analizler SPSS v25 (IBM Corp., Chicago, IL, ABD) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin normallik ve varyans homojenliği değerlendirilmiştir. Dağılıma bağlı olarak SBS ve FS verileri Kruskal-Wallis testi ve ikili karşılaştırmalar için Bonferroni düzeltmeli Dunn testi kullanılarak analiz edilmiştir. Anlamlılık düzeyi $\alpha=0,05$ olarak belirlenmiştir. Materyaller arasındaki kırılma tipi dağılımları ki-kare bağımsızlık testi ile karşılaştırılmış; etki büyüklüğü Cramér's V ile ifade edilmiş ve hücre bazlı sapmalar için standartlaştırılmış artık değerler incelenmiştir.

BULGULAR

MAKASLAMA BAĞLANMA DAYANIMI

Materyallerin SBS değerlerine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 2 ve Şekil 1'de sunulmuştur. Medyan SBS (MPa) değerleri en yüksekten en düşüğe şu şekilde sıralanmıştır: IPS Empress Direct (23,02)>Opus Bulk Fill Flow (22,11)>Tetric PowerFill (20,08)>Opus Bulk Fill (17,81)>SonicFill 3 (12,24)>Tetric PowerFlow (11,04).

Genel karşılaştırma istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Kruskal-Wallis $H(5)=36,319$; $p<0,001$). Materyal türünün bağlanma dayanımı üzerindeki etki büyüklüğü $\varepsilon^2=0,62$ olarak hesaplanmış olup, bu değer materyal seçiminin bağlanma sonuçları üzerinde oldukça güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bonferroni düzeltmeli Dunn testine göre Tetric PowerFlow, Tetric PowerFill'e ($p=0,007$), Opus Bulk Fill Flow'a ($p<0,001$) ve IPS Empress Direct'e ($p<0,001$) kıyasla anlamlı derecede daha düşük SBS göstermiştir; ancak Opus Bulk Fill ($p=0,181$) ve SonicFill 3 ($p=1,000$) ile anlamlı fark saptanmamıştır. SonicFill 3, Tetric PowerFill ($p=0,032$), Opus

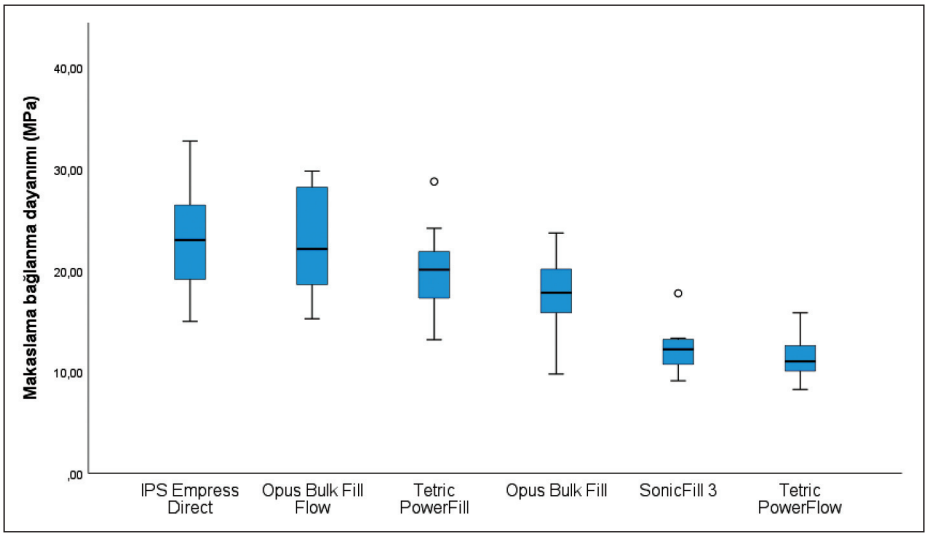
TABLO 2: Makaslama bağlanma dayanımı (MPa): materyallere göre tanımlayıcı istatistikler (n=10)

Materyal	Medyan (Q1-Q3)*	X̄±SS	Minimum-maksimum
IPS Empress Direct	23,02 (18,80-27,47)^{B}	23,41±5,75	15,00-32,78
Opus Bulk Fill Flow	22,11 (18,39-28,28)^{B}	22,56±5,00	15,25-29,81
Tetric PowerFill	20,08 (16,81-22,45)^{B}	19,99±4,50	13,18-28,78
Opus Bulk Fill	17,81 (15,15-20,81)^{AB}	17,58±4,20	9,80-23,70
SonicFill 3	12,24 (10,65-13,24)^{A}	12,33±2,37	9,15-17,76
Tetric PowerFlow	11,04 (10,05-12,83)^{A}	11,46±2,11	8,28-15,83

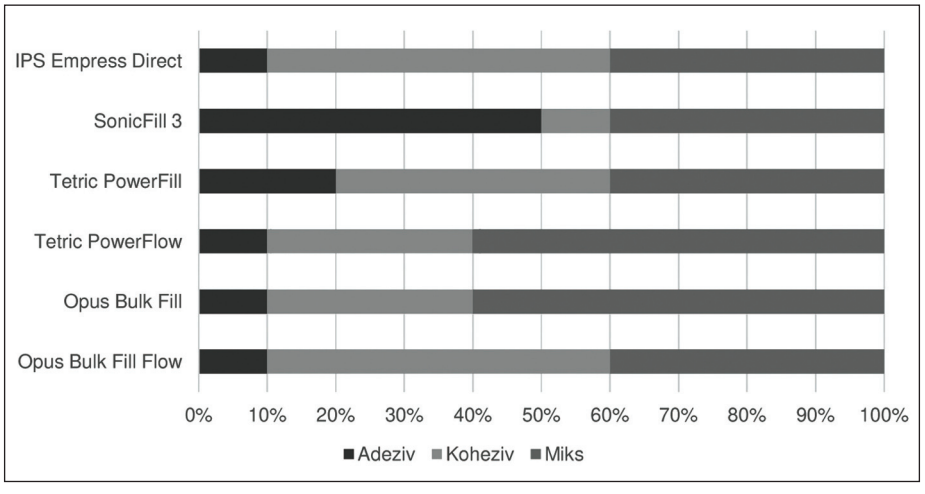
*Q1-Q3: %25 ve %75'lik çeyreklik dilimleri temsil etmektedir.

Aynı harf ile işaretlenmiş gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur (Bonferroni düzeltmeli p>0,05). Farklı harfler, gruplar arasındaki anlamlı farklılığı ifade etmektedir (Bonferroni düzeltmeli p<0,05).

Bulk Fill Flow (p=0,002) ve IPS Empress Direct'e (p=0,001) göre anlamlı derecede daha düşük SBS değerleri göstermiş; buna karşın Opus Bulk Fill (p=0,553) ve Tetric PowerFlow (p=1,000) ile fark bulunmamıştır. Düzeltme sonrası diğer ikili karşılaştırmalar anlamlılık göstermemiştir. Kırılma tipi dağılımları Şekil 2'de sunulmuş olup en sık miks, en az sıklıkla adeziv kırılmalar gözlenmiştir. Materyaller arasında kırılma tipi dağılımları açısından anlamlı fark saptanmamıştır ($\chi^2(10)=11,43$; p=0,325; Cramér's V=0,309). Standartlaştırılmış artık değer-

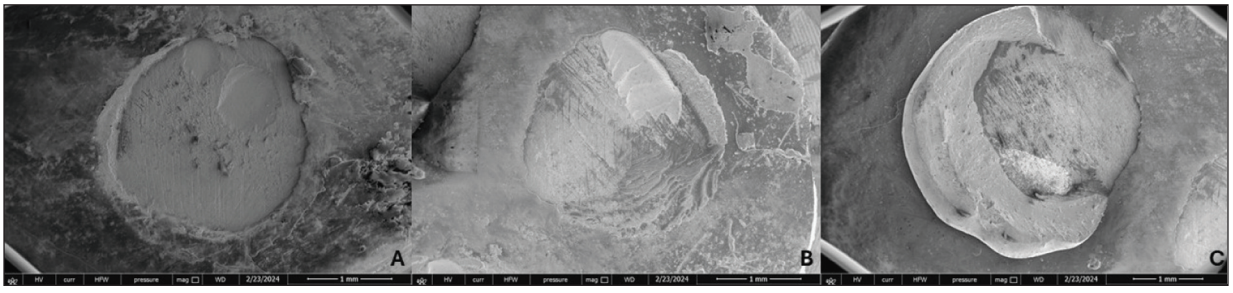


ŞEKİL 1: Test edilen materyallerin makaslama bağlanma dayanımı değerlerine ait kutu grafiği. Yatay kalın çizgiler medyanı, kutular çeyreklikler arası genişliği temsil etmektedir. Grafikteki daireler (o) aykırı değerleri göstermektedir.



ŞEKİL 2: Dentine makaslama bağlanma dayanımı sonrası kırılma tipi dağılımı (her materyal için n=10)

Yığılmış %100 çubuk grafikler, her bir kompozit için adeziv, koheziv ve miks kırılmaların yüzdesel dağılımını göstermektedir. Miks kırılmalar baskın, adeziv kırılmalar ise en düşük sıklıkta gözlenmiştir. Gruplar arasında kırılma tipi dağılımları açısından anlamlı fark saptanmamıştır ($\chi^2(10)=11,43$; p=0,325; Cramér's V=0,309). SonicFill 3 için beklenenden daha fazla adeziv kırılma olurken; diğer hücrelerde anlamlı bir sapma izlenmemiştir.



RESİM 2: Dentine makaslama bağlanma dayanımı testi sonrası kırılma yüzeylerine ait temsili SEM görüntüleri

• **(A) Adeziv Kırılma:** Düşük SBS değerlerine sahip gruplarda karakteristik olan, dentin yüzeyinden malzemenin tamamen ayrıldığı ve belirgin kompozit kalıntısı içermeyen pürüzsüz yüzey topografyası (85×).

• **(B) Miks Kırılma:** Çalışmada en sık gözlenen; hem açık dentin alanlarının hem de düzensiz, kademeli hatlar sergileyen kompozit rezin kalıntılarının bir arada izlendiği kırılma paterni (85×). Bu tablo, adeziv sistemin materyal koheziv direnciyle dengeli bir bağ kurduğunu yansıtır.

• **(C) Koheziv Kırılma:** Yüksek SBS değerlerini temsil eden; kompozit matrisi içerisinde derin kırılma hatları ve kütlesel kopmaların izlendiği patern (70×). Bu görünüm, adeziv bağın materyalin yapısal bütünlüğünü aştığını kanıtlamaktadır.

Teknik Detaylar: Alan emisyonlu SEM (FE-SEM), ~3 kV; büyütme: A ve B 85×, C 70×; ölçek çubukları 1 mm.

ler, SonicFill 3 grubunda beklenenden daha fazla adeziv kırılma olduğunu göstermiştir; diğer hücrelerde anlamlı bir sapma izlenmemiştir. Temsili SEM görüntüleri Resim 2'de sunulmaktadır.

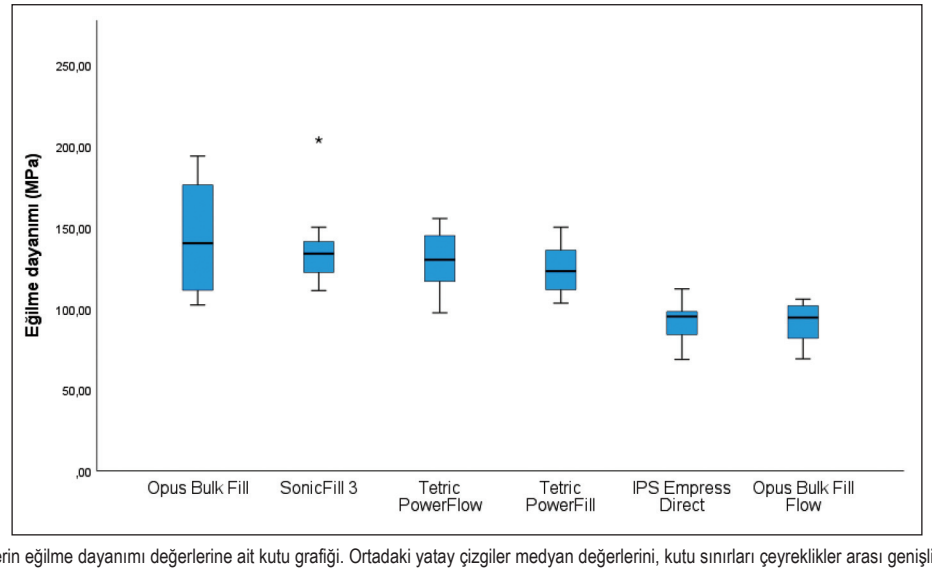
EĞİLME DAYANIMI

Materyallerin FS değerlerine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 3 ve Şekil 3'te sunulmuştur. Medyan FS (MPa) değerleri en yüksekten en düşüğe şu şekilde sıralanmıştır: Opus Bulk Fill (140,33)>SonicFill 3 (133,95)>Tetric PowerFlow (130,18)>Tetric Power-

TABLO 3: Eğilme dayanımı (MPa): materyallere göre tanımlayıcı istatistikler (n=10)

Materyal	Medyan (Q1-Q3)*	X̄±SS	Minimum-maksimum
Opus Bulk Fill	140,33 (111,18-177,60)^{B}	141,98±32,98	102,30-194,06
SonicFill 3	133,95 (122,08-143,55)^{B}	138,79±25,43	111,21-204,02
Tetric PowerFlow	130,18 (116,49-145,67)^{B}	129,89±18,33	97,50-155,60
Tetric PowerFill	123,10 (110,21-136,70)^{B}	123,98±15,24	103,48-150,23
IPS Empress Direct	95,21 (82,00-100,20)^{A}	92,27±13,22	68,67-112,15
Opus Bulk Fill Flow	94,55 (79,84-101,97)^{A}	90,92±12,69	69,09-105,90

*Q1-Q3: %25 ve %75'lik çeyreklik dilimleri temsil etmektedir. Aynı harf ile işaretlenmiş gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur (Bonferroni düzeltmeli p>0,05). Farklı harfler (A ve B), gruplar arasındaki anlamlı farklılığı ifade etmektedir (Bonferroni düzeltmeli p<0,05).



ŞEKİL 3: Materyallerin eğilme dayanımı değerlerine ait kutu grafiği. Ortadaki yatay çizgiler medyan değerlerini, kutu sınırları çeyreklikler arası genişliği temsil etmektedir. SonicFill 3 grubundaki yıldız (*), bu gruptaki aykırı değeri göstermektedir.

Fill (123,10)>IPS Empress Direct (95,21)>Opus Bulk Fill Flow (94,55).

Materyallerin FS değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmıştır (Kruskal-Wallis, H(5)=36,183; p<0,001). Materyal türünün FS üzerindeki etki büyüklüğü ε^2=0,61 olarak hesaplanmış olup, bu değer materyal seçiminin eğilme direnci sonuçları üzerinde oldukça güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dunn testiyle yapılan ikili karşılaştırmalar (Bonferroni düzeltmeli), Opus Bulk Fill Flow ve IPS Empress Direct'in; Opus Bulk Fill (p=0,001 ve p=0,002), SonicFill 3 (p=0,001), Tetric PowerFlow (p=0,004 ve p=0,005) ve Tetric PowerFill'e (p=0,031 ve p=0,037) kıyasla anlamlı derecede daha düşük FS değerleri sergilediğini göstermiştir. Öte yandan Opus Bulk Fill, SonicFill 3, Tetric PowerFlow ve Tetric PowerFill arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (p=1,000). Benzer şekilde, IPS Empress Direct ile Opus Bulk Fill Flow arasındaki farkın da anlamlı olmadığı saptanmıştır (p=1,000).

TARTIŞMA

Bu çalışmada, üreticiler tarafından önerilen spesifik polimerizasyon protokolleri altında test edilen farklı bulk-fill kompozitler arasında hem SBS hem de FS açısından istatistiksel olarak anlamlı farklar saptanmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, test edilen materyallerin bağlanma ve eğilme performanslarının benzer olduğunu öne süren her iki sıfır hipotezi de ($H0_1$ ve $H0_2$) reddedilmiştir. SBS ve FS parametrelerinin aynı deneysel tasarımda eş zamanlı olarak değerlendirilmesi, restoratif materyalin hem adeziv arayüz bütünlüğünü hem de yapısal direncini kapsayan klinik performans potansiyelini iki farklı düzlemde analiz etme imkânı tanımıştır.

Literatürde, dental restoratif materyallerin kütlesel mekanik özelliklerinin (FS gibi) ve adeziv arayüzey performanslarının (bağlanma dayanımı gibi) genellikle birbirinden bağımsız olarak değerlendirildiği bildirilmiştir. Naguib ve ark., doldurucu partiküllerin FS'yi materyal içindeki çatlak ilerlemesini durdurarak ve stres transferini optimize ederek (kütle etkisi) artırdığını; buna karşın bağlanma dayanımını dentin tübüllerine penetrasyon ve büzülme kontrolü (arayüzey etkisi) üzerinden etkilediğini vurgulamıştır.[16] Bu nedenle, korelasyon analizinden ziyade, her iki parametrenin de ultra-hızlı kürleme protokolü altında kabul edilebilir sınırlar içinde kalıp kalmadığının tespiti, materyalin klinik güvenilirliğini doğrulamak adına bütüncül bir yaklaşım olarak benimsenmiştir.

Elde edilen sonuçlar materyale bağlı olarak farklılık göstermiş ve tek tip bir bulk-fill etkisinden ziyade formülasyona özgü bir davranışa işaret etmiştir. SBS ve FS farklı yapısal özellikleri -sırasıyla arayüz adezyonu ve kütlesel mekanik yanıtı- değerlendirdiğinden, bulgular klinik uzun ömür için birbirinin yerine geçen göstergeler olarak değil, paralel ve tamamlayıcı çıktılar olarak yorumlanmıştır.[4]

Kırılma analizi SBS sonuçlarıyla paralellik göstermiştir: miks kırılmalar baskın olup adeziv kırılmalar en düşük sıklıkta izlenmiş ve genel kırılma tipi dağılımları materyaller arasında anlamlı farklılık göstermemiştir. Hücre bazlı standartlaştırılmış artık değerler, SonicFill 3 grubunda göreceli olarak daha fazla adeziv kırılma eğilimine işaret etmiş; bunun dışında anlamlı bir sapma saptanmamıştır. SBS değerleriyle birlikte kırılma tipi dağılımlarının raporlanması, kırılma başlangıcının daha iyi yorumlanmasına olanak tanımakta ve tek bir ölçüte dayalı aşırı yorumların önüne geçmektedir. Temsili SEM görüntüleri arayüz morfolojisini nitel olarak göstermekte olup, çıkarımsal karşılaştırmalar amacıyla kullanılmamıştır.

Bulk-fill kompozitlerin polimerizasyonu sadece ışık şiddeti (irradiance) seviyelerine değil, daha kritik olarak materyale aktarılan toplam radyan maruziyet (enerji yoğunluğu) miktarına bağlıdır. Çalışmamızda, 3 sn'lik ultra-yüksek irradiyans protokolü ile çok daha kısa bir sürede yeterli radyan maruziyet (J/cm^2) değerine ulaşılması hedeflenmiştir. Bununla birlikte bu enerjinin bu kadar hızlı iletilmesi, toplam enerji miktarı aynı olsa bile, düşük ışık şiddeti kullanılan uzun süreli protokollere kıyasla daha yüksek polimerizasyon stresine yol açabilmektedir.

Ürüne özgü ışık şiddeti×süre ayarları, tasarım gereği gruplar arasında farklı radyan maruziyetlere yol açmıştır. Bu yaklaşım, özellikle yüksek ışık şiddeti ve kısa süreli polimerizasyon modlarının kulla-

nıldığı klinik uygulamaları yansıtmakla birlikte materyaller arası doğrudan nedensel karşılaştırmaları sınırlamaktadır. Çok kısa ışınlama sürelerinde, başlatıcı sistemler, opaklık/doldurucu içeriği ve viskozitenin polimerizasyon derecesi, büzülme gerilmesi ve ısısal artışı etkilemesi nedeniyle karşılıklılık (reciprocity) ilkesi her zaman geçerli olmayabilir. Bu nedenle ışık şiddeti ve radyan maruziyet değerleri şeffaf biçimde raporlanmış ve sonuçlar, genel bir polimerizasyon tekniğinden ziyade her bir materyalin önerilen polimerizasyon protokolü altındaki performansı temel alınarak yorumlanmıştır.[6,8,9,17-20]

SBS, materyaller arasında ayırt edici olmakla birlikte, makaslama ağırlıklı gerilme alanları ve örnek geometrisinin mutlak değerleri etkilemesi nedeniyle tarama düzeyinde bir gösterge olarak ele alınmıştır.[21,22] Mikro ölçekli testler (μTBS/μSBS), arayüz dayanımı ve kırılma odaklarını daha yüksek mekânsal hassasiyetle ortaya koyabilse de, ilave hazırlık kaynaklı değişkenlik ve zaman maliyeti getirmektedir; bu nedenle SBS, dayanıklılığın doğrudan bir vekili olmaktan ziyade, bütüncül kanıt setinin bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir.[21,23] Hızlı polimerizasyon rejimleri altında, kompozite özgü kinetikler arayüz özelliklerini değiştirebileceğinden, çıkarımlar tüm polimerizasyon senaryolarına genellenmeden, yalnızca test edilen koşullarla sınırlı tutulmuştur.[6,8,9,17-20] Bu çalışmanın SBS paterni, hızlı polimerizasyon altında PowerFlow için daha düşük performans ve PowerFill'e kıyasla azalmış marjinal bütünlük bildirilen çalışmalarla uyum göstermekte olup, SonicFill'e ilişkin karşılaştırmalı bulguların ise literatürde tutarsızlık gösterdiği görülmektedir.[24-26]

FS, kompozisyonla uyumlu bir patern içinde materyaller arasında ayırt edici olmuştur. FS tek başına klinik performansı öngörmese de yüksek yük taşıyan bölgelerde bükülme gerilmelerine karşı direncin bir göstergesi olarak kabul edilebilir; SBS ve kırılma tipleriyle birlikte değerlendirildiğinde ise materyal davranışına daha bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır.[27,28] Yorumlar, direkt restoratif materyaller için geçerli ISO gerekliliklerine (üç nokta FS için minimum 80 MPa) referansla yapılmıştır.[15]

Bu çalışmada elde edilen FS ve SBS değerleri, materyallerin bileşim verileriyle doğrudan ilişkilendirilebilir. Çalışmada gözlenen yüksek FS değerleri, materyallerin inorganik doldurucu ağırlıklarıyla paralellik göstermektedir. Opus Bulk Fill Flow APS gibi akışkan bulk-fill materyallerin, pasta formundaki versiyonlarına göre daha düşük FS değerleri sergilemesi, düşük viskozite sağlamak adına inorganik doldurucu oranlarının azaltılmış olmasından kaynaklanmış olabilir. FS sıralaması, Empress Direct'in Opus Bulk Fill'in akışkan versiyonuna göre daha yüksek dayanım gösterdiğini ancak karşılaştırılan diğer bulk-fill kompozitlere kıyasla daha düşük değerlere sahip olduğunu bildiren önceki verilerle de uyumludur.[29] Nitekim SonicFill 3 grubunun sergilediği performans da benzer şekilde, ağırlıkça yaklaşık %81,5 ile test edilen materyaller arasındaki en yüksek inorganik içeriğe sahip olmasıyla açıklanabilir. Her ne kadar sonik aktivasyon viskoziteyi düşürerek adaptasyonu artırmayı hedeflese de literatürde SonicFill uygulamasının dentin-kompozit arayüzeyinde belirgin bir gerilime yol açabileceği bildirilmiştir. Duarte ve ark., SEM incelemelerinde SonicFill grubunda dentin yüzeyinde mikroskobik boşluklar gözlemlemiş ve bu durumun materyalin yüksek çekme ve basma dayanımına bağlı olarak gelişen arayüzey stresiyle ilişkili olabileceğini belirtmiştir.[30] Çalışmamızdaki SBS düşüşü, materyalin ağırlıkça %81,5 oranındaki yüksek doldurucu yükünün yarattığı yüksek elastik modülün, polimerizasyon sırasında dentin arayüzeyine binen stresi kompanse edememesi ve sonuçta mikroskobik düzeyde adaptasyon kayıplarına yol açmasıyla açıklanabilir. Bu durum, SonicFill 3'ün FS testlerinde sergilediği yüksek mekanik direncin aksine bağlanma dayanımında neden daha sınırlı bir performans sergilediğini nedensel olarak ortaya koymaktadır.

Tetric PowerFill grubunda kullanılan 3 sn'lik yüksek yoğunluklu (3.000 mW/cm²) polimerizasyon protokolüne rağmen elde edilen stabil değerler, bu materyallerin kimyasal yapısındaki "Ivocerin" fotobaşlatıcısına bağlanabilir. Geleneksel sistemlere göre daha yüksek kuantum verimliliğine sahip olan bu başlatıcı, 9 J/cm² gibi daha düşük bir radyan maruziyetinde bile (Opus grubundaki 24-36 J/cm² değerlerine kıyasla) benzer performans sağlayabilmiştir. Buna karşın SBS testlerinde Tetric PowerFlow'un PowerFill'e göre daha düşük değerler sergilemesi,

bu iki materyalin farklı stres yönetim stratejileriyle ilişkilendirilebilir. Literatürde, Tetric PowerFill'in AFCT teknolojisi sayesinde polimerizasyon sırasında oluşan iç stresleri hafiflettiği; ancak Tetric PowerFlow'un benzer bir moleküler mekanizmaya sahip olmayıp, daha yüksek polimerizasyon büzülme gerilimi sergilediği bildirilmiştir.[31] PowerFlow grubunda gözlenen bu yüksek büzülme stresi, adeziv arayüzeyde gerilim birikmesine yol açarak bağlanma dayanımını olumsuz etkilemiş olabilir. Her iki materyalin FS değerlerinin benzer çıkması, ultra-hızlı kürleme ile her iki materyalin de yapısal bütünlüğünü kazandığını, ancak arayüzey adaptasyonu noktasında PowerFill'in AFCT teknolojisiyle bir adım öne geçtiğini göstermektedir.

Kompozitlerin mekanik direnç ve bağlanma karakteristikleri, kullanılan monomerlerin moleküler ağırlığı ve reaktivitesi ile yakından ilişkilidir. Özellikle Opus grubunda kullanılan üretan dimetakrilat monomerleri, çapraz bağlanma yoğunluğunu artırırken polimerizasyon büzülmesini minimize ederek dentin-kompozit arayüzündeki bağlanma stabilitesine katkıda bulunmuş olabilir. Bu yapısal avantaja ek olarak Opus serisinde yer alan APS teknolojisinin, fotobaşlatıcı sisteminin verimliliğini optimize ederek farklı ışık yoğunluklarında bile yeterli bir dönüşüm derecesi elde edilmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu teknoloji sayesinde sağlanan polimerizasyon kinetiğinin, materyalin derin tabakalarda daha homojen sertleşmesine yardımcı olabileceği ve polimerizasyon stresinin hibrit tabaka üzerindeki olası olumsuz etkilerini sınırlayarak SBS sonuçlarını olumlu yönde etkilemiş olabileceği öngörülmektedir.

Restorasyon yüzeyine iletilen enerji; ışınlama süresi, ışık şiddeti, ışık ucu-yüzey mesafesi ve açılanması, ışın demeti profili ile erişim koşullarına bağlıdır. Klinik öncelikler izin verdiğinde, yeterli ışınlama süresiyle birlikte orta düzey ışık şiddetinin kullanılması, bazı materyallerde derinlik boyunca daha sağlam bir polimerizasyon derecesi sağlayabilir.[17-20]

Çalışmamızda kullanılan adeziv sistemin (Adhese Universal) 3 sn'lik yüksek yoğunluklu polimerizasyon protokolü hem materyal teknolojisi hem de güncel literatür bulguları ile desteklenmektedir. Klarić ve ark., 10-MDP bazlı universal adezivlerin 3.000 mW/cm² şiddetindeki ışıkla 3 sn polimerize edildiğinde, hem başlangıç hem de 12 aylık yaşlandırma süreci sonunda geleneksel protokollerle (20 sn) benzer bağlanma dayanımı sergilediğini rapor etmiştir.[32] Bu stabilite, 10-MDP monomerinin dentin apatiti ile oluşturduğu kalsiyum tuzlarının hidrolitik degradasyona karşı gösterdiği dirençle açıklanabilir. Ayrıca Barcelos ve ark., bu sistemde kullanılan Ivocerin gibi parçalanma tipi (cleavage-type) fotobaşlatıcıların, geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksek kuantum verimliliğine sahip olduğunu ve foton başına çift radikal üreterek polimerizasyon kinetiğini hızlandırdığını kanıtlamıştır.[33] Dolayısıyla Ivocerin'in sağladığı hızlı ve yüksek dönüşüm derecesi (DC), 10-MDP'nin kimyasal bağlanma avantajıyla birleşerek çok kısa ışınlama sürelerinde dahi hibrit tabakanın kalitesini ve bağlanma dayanımının sürekliliğini korumaktadır. Böylece adeziv, üzerine uygulanan bulk-fill kompozitin viskozitesi (akışkan veya yüksek viskoziteli olması) ile birleştiğinde, materyalin dentin tübüllerine ve adeziv yüzeyine adaptasyon kabiliyetini değiştirerek mikromekanik kilitlenmeyi doğrudan etkileyebilmektedir.

Çalışmamızda elde edilen SBS verileri, kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri ile morfolojik olarak desteklenmiştir. Resim 2A'da izlenen adeziv kırılma paterni, özellikle düşük SBS değerleri sergileyen örneklerde baskındır. Adeziv kırılma paterni, dentin yüzeyinden malzemenin makroskobik düzeyde tamamen ayrıldığını ve yüzeyin nispeten düzgün bir topografya sergilediğini göstermektedir. Düşük büyütmede dahi yüzeyde belirgin bir kompozit kalıntısının izlenmemesi, adeziv sistemin dentin üzerinde stabil bir mekanik kilitlenme oluşturamadığının bir göstergesidir.

Öte yandan, çalışmada en sık karşılaşılan miks kırılma tipi, adeziv sistemin dentin dokusuyla kurduğu bağın, materyalin kendi iç direnciyle (koheziv kuvvetler) dengeli bir dayanım sergilediğini kanıtlamaktadır (Resim 2B). SEM incelemesinde, dentin yüzeyinin bir kısmının açığa çıktığı, ancak geniş bir alanda düzensiz ve kademeli hatlar sergileyen kompozit rezin kalıntılarının bulunduğu gözlenmiştir. Mikroskobik düzeyde hem arayüz ayrılmasının hem de kompozit içi kırılma hatlarının birlikte izlenmesi, 3 sn'lik ışınlama protokolünün dahi birçok grupta kli-

nik olarak kabul edilebilir bir arayüzey entegrasyonu oluşturabildiğine dair morfolojik bir kanıttır.

Yüksek SBS değerlerine sahip örneklerde gözlenen koheziv kırılmalar ise, adeziv bağın gücünün rezin materyalinin yapısal bütünlüğünü aştığını gösteren en güçlü göstergedir (Resim 2C). Bu görüntülerde kompozit matrisi içerisindeki düzensiz kırılma hatları, mekanik stresin arayüzde birikmek yerine materyal kütlesine başarılı bir şekilde aktarıldığını doğrulamaktadır.

Literatürde, farklı bulk-fill materyallerin bağlanma dayanımı değerleri arasında görülen farklılıklar; dentin yüzey hazırlığı, ışık cihazının irradiyans değeri ve kullanılan test hızlarındaki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir. Öte yandan bu çalışmada, materyallerin erken dönem performansları değerlendirilmiştir. Termal siklus gibi yapay yaşlandırma prosedürlerinin uygulanmamış olması çalışmamızın bir kısıtlılığıdır. Yaşlandırma süreci, hibrit tabakanın hidrolitik degradasyonuna yol açarak değerleri düşürebileceği için sonuçlar değerlendirilirken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmanın diğer sınırlılıkları; üreticiye özgü protokollerin doğası gereği gruplar arasında heterojen radyan maruziyet bulunması, doğrulama sağlayabilecek diğer mikro bağlanma dayanımı testleri olmaksızın SBS'ye dayanılması ve derinlik boyunca polimerizasyon derecesi veya mikrosertlik profillemesinin yapılmamış olmasıdır. Gelecek çalışmalarda, yüzeyde doğrulanmış sabit radyan maruziyet içeren standartlaştırılmış bir kolun eklenmesi, polimerizasyon derecesi/mikrosertlik haritalaması ve sıcaklık izlemenin dâhil edilmesi ve arayüz ile kütlesel özellikler arasındaki ilişkilerin incelenmesi önerilmektedir.

SONUÇ

Üretici talimatlarına uygun polimerizasyon koşulları altında, değerlendirilen rezin kompozitler arasında hem dentin SBS hem de FS açısından anlamlı farklılıklar saptanmış; bu durum tek tip bir "bulk-fill etkisi"nden ziyade formülasyona bağlı performansı işaret etmiştir. Kırılma tipi paternleri (çoğunlukla miks; en az sıklıkla adeziv), SBS sonuçlarıyla uyumlu olup kırılmanın nerede başladığına ilişkin açıklayıcı bilgi sağlamaktadır. SBS ve FS farklı yapısal özellikleri -sırasıyla arayüz adezyonu ve kütlesel mekanik yanıtı- değerlendirdiğinden, bu çıktılar klinik uzun ömür için birbirinin yerine geçen göstergeler olarak değil, yan yana ve tamamlayıcı biçimde yorumlanmalıdır.

Test edilen *in vitro* koşullar dâhilinde, hızlı kürleme protokolüne sahip pasta bulk-fill kompozitlerin dentine bağlanma ve FS değerleri, geleneksel bulk-fill materyallerle benzer bulunmuştur. Ancak, ağız ortamının termal ve mekanik streslerini tam olarak yansıtabilmek için bu bulguların uzun dönemli klinik çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, çalışmada kullanılan rezin kompozitlerin temini için FGM, Ivoclar ve Kerr firmalarına teşekkür eder.

Finansal Kaynak

Bu çalışma sırasında, yapılan araştırma konusu ile ilgili doğrudan bağlantısı bulunan herhangi bir ilaç firmasından, tıbbi alet, gereç ve malzeme sağlayan ve/veya üreten bir firma veya herhangi bir ticari firmadan, çalışmanın değerlendirme sürecinde, çalışma ile ilgili verilecek kararı olumsuz etkileyebilecek maddi ve/veya manevi herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Protetik Diş Tedavisi alanında doktora derecesine sahip olan Dr. Esra Silahtar, Ivoclar şirketinde eğitmen olarak görev yapmaktadır. Söz konusu firmanın ürünleri bu çalışmada incelenmiş olsa da, yazarın bu çalışmadaki rolü yalnızca veri analizi ve makalenin eleştirel incelemesi aşamalarıyla sınırlıdır. Yazar, bu profesyonel ilişkinin mevcut çalışmanın metodolojisi, bulguları ve sonuçlarının tarafsızlığı üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını beyan eder. Diğer yazarların herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Fikir/Kavram: *Merve Şahin, Emine Kıtın, Ezgi Erden Kayalıdere;* ***Tasarım:*** *Merve Şahin, Emine Kıtın, Ümit Begüm Güray Efes;* ***Denetleme/Danışmanlık:*** *Merve Şahin, Emine Kıtın, Ezgi Erden Kayalıdere;* ***Veri Toplama ve/veya İşleme:*** *Merve Şahin, Emine Kıtın;* ***Analiz ve/veya Yorum:*** *Merve Şahin, Esra Silahtar;* ***Kaynak Taraması:*** *Merve Şahin, Ezgi Erden Kayalıdere;* ***Makalenin Yazımı:*** *Merve Şahin;* ***Eleştirel İnceleme:*** *Ümit Begüm Güray Efes, Esra Silahtar.*

KAYNAKLAR

1. Ferracane JL. Resin composite—state of the art. Dent Mater. 2011;27(1):29-38. [PubMed]
2. Kaisarly D, El Gezawi M. Polymerization shrinkage assessment of dental resin composites: a literature review. Odontology. 2016;104(3):257-70. [PubMed]
3. 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. [PubMed]
4. Van Ende A, De Munck J, Lise DP, Van Meerbeek B. Bulk-fill composites: a review of the current literature. J Adhes Dent. 2017;19(2):95-109. [PubMed]
5. Gutierrez-Leiva A, Pomacóndor-Hernández C. Comparación de la profundidad de polimerización de resinas compuestas bulk fill obtenida con dos unidades de fotoactivación LED: polywave versus monowave. Odontología Sanmarquina. 2020;23(2):131-8. [Crossref]
6. Par M, Marovic D, Attin T, Tarle Z, Tauböck TT. The effect of rapid high-intensity light-curing on micromechanical properties of bulk-fill and conventional resin composites. Sci Rep. 2020;10(1):10560. [PubMed] [PMC]
7. Oliver MJL. The effect of depth-of-cure on the flexural strength of bulk fill composites [Master's thesis]. Bethesda (MD): Uniformed Services University of the Health Sciences; 2020. [Link]
8. Par M, Burrer P, Prskalo K, Schmid S, Schubiger AL, Marovic D, et al. Polymerization kinetics and development of polymerization shrinkage stress in rapid high-intensity light-curing. Polymers (Basel). 2022;14(16):3296. [Crossref] [PubMed] [PMC]
9. Hayashi J, Tagami J, Chan D, Sadr A. New bulk-fill composite system with high irradiance light polymerization: integrity and degree of conversion. Dent Mater. 2020;36(12):1615-23. [PubMed]
10. Yang J, Silikas N, Watts DC. Polymerization and shrinkage kinetics and fracture toughness of bulk-fill resin-composites. Dent Mater. 2022;38(12):1934-41. [Crossref] [PubMed]
11. Marovic D, Par M, Mandic E, Smiljanic T, Negovetic Mandic V, Panduric V, et al. New universal bulk-fill composites with translucency shift: impact of rapid curing and ageing on polymerisation and mechanical properties. Materials (Basel). 2025;18(24):5613. [PubMed] [PMC]
12. Tapety CM, Carneiro YK, Chagas YM, Souza LC, Souza NO, Valadas LA. Degree of conversion and mechanical properties of a commercial composite with an advanced polymerization system. Acta Odontol Latinoam. 2023;36(2):112-9. [Crossref] [PubMed] [PMC]
13. Sultan S, Chaudhary S, Chaitra TR, Manuja N, Amit SA, Hebbal MI, et al. Evaluation of the dentinal shear bond strength and resin interface in primary molars after pre-treatment with various dentin bio-modifiers: an in vitro study. J Funct Biomater. 2024;15(2):41. [PubMed] [PMC]
14. Moghaddasi N, Tavallali M, Jafarpour D, Ferooz R, Bagheri R. The effect of nanofilled resin-base coating on the mechanical and physical properties of resin composites. Eur J Dent. 2021;15(2):202-9. [Crossref] [PubMed] [PMC]
15. International Organization for Standardization: ISO 4049 Dentistry — [Link]
16. Naguib G, Maghrabi AA, Mira AI, Mously HA, Hajjaj M, Hamed MT. Influence of inorganic nanoparticles on dental materials' mechanical properties. A narrative review. BMC Oral Health. 2023;23(1):897. [PubMed] [PMC]
17. de Deus RA, Oliveira L, Braga S, Ribeiro M, Price RB, Núñez A, et al. Effect of radiant exposure on the physical and mechanical properties of 10 flowable and high-viscosity bulk-fill resin composites. Oper Dent. 2024;49(2):136-56. [Crossref] [PubMed]
18. Marovic D, Par M, Daničić P, Marošević A, Bojo G, Alerić M, et al. The role of rapid curing on the interrelationship between temperature rise, light transmission, and polymerisation kinetics of bulk-fill composites. Int J Mol Sci. 2025;26(6):2803. [PubMed] [PMC]
19. Steffen T, Par M, Attin T, Tauböck TT. Effect of fast high-irradiance photo-polymerization of resin composites on the dentin bond strength. Materials (Basel). 2022;15(21):7467. [Crossref] [PubMed] [PMC]
20. 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. [PubMed] [PMC]
21. Heintze SD. Systematic reviews: I. The correlation between laboratory tests on marginal quality and bond strength. II. The correlation between marginal quality and clinical outcome. J Adhes Dent. 2007;9 Suppl 1:77-106. Erratum in: J Adhes Dent. 2007;9(6):546. [PubMed]
22. Kumar N. Inconsistency in the strength testing of dental resin-based composites among researchers. Pak J Med Sci. 2013;29(1):205-10. [PubMed] [PMC]
23. Süsgün Yıldırım Z, Eyiler E, Bek Kürklü ZG. Effect of thickness on the degree of conversion, monomer elution, depth of cure and cytotoxicity of bulk-fill composites. J Oral Sci. 2023;65(2):121-6. [PubMed]
24. Pereira R, Lima DANL, Giorgi MCC, Marchi GM, Aguiar FHB. Evaluation of bond strength, nanoleakage, and marginal adaptation of bulk-fill composites submitted to thermomechanical aging. J Adhes Dent. 2019;21(3):255-64. [PubMed]
25. Klarić Sever E, Vukelja J, Par M, Marović D, Tarle Z. The effect of curing mode of a high-power LED unit on dentin bond strength. 100th IADR General Session; 2022 Jun 20-25; Virtual. Dental Materials 4: Adhesion. [Link]
26. Hamza B, Zimmerman M, Attin T, Tauböck TT. Marginal integrity of classical and bulk-fill composite restorations in permanent and primary molars. Sci Rep. 2022;12(1):13670. [PubMed] [PMC]
27. Shackelford JF. Introduction to Materials Science for Engineers. 8th ed. Upper Saddle River: Pearson; 2016. p.632-51.
28. Lambrechts P, Braem M, Vanherle G. Buonocore memorial lecture. Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives. Oper Dent. 1987;12(2):53-78. [PubMed]
29. Rosa de Lacerda L, Bossardi M, Silveira Mitterhofer WJ, Galbiatti de Carvalho F, Carlo HL, Piva E, et al. New generation bulk-fill resin composites: effects on mechanical strength and fracture reliability. J Mech Behav Biomed Mater. 2019;96:214-8. [Crossref] [PubMed]
30. Duarte JCL, Costa AR, Veríssimo C, Duarte RW, Calabrez Filho S, Spohr AM, et al. Interfacial stress and bond strength of bulk-fill or conventional composite resins to dentin in Class II restorations. Braz Dent J. 2020;31(5):532-9. [PubMed]
31. Miranda SB, Alves MO, Falson LA, Leal CF, de Andrade AK, Lins RB, et al. Effect of ultra-fast high-intensity light-curing on the properties of a new bulk-fill restorative resin composite system: a scoping review. J Clin Exp Dent. 2024;16(7):e898-911. [Crossref] [PubMed] [PMC]
32. Klarić E, Bosnić JV, Par M, Tarle Z, Marovic D. One-year evaluation of high-power rapid curing on dentin bond strength. Materials (Basel). 2024;17(10):2297. [Crossref] [PubMed] [PMC]
33. Barcelos LM, Borges MG, Soares CJ, Menezes MS, Huynh V, Logan MG, et al. Effect of the photoinitiator system on the polymerization of secondary methacrylamides of systematically varied structure for dental adhesive applications. Dent Mater. 2020;36(3):468-77. [Crossref] [PubMed] [PMC]