Acta Odontologica Turcica
The official journal of Gazi University Faculty of Dentistry

DOI: https://doi.org/10.17214/gaziaot.1607854

Derleme

Şeffaf plakların (hizalayıcıların) fiziksel, mekanik ve optik özellikleri

Cansu Oğan[1], **Çağrı Türköz**[1]

[1]*Ortodonti Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*

Özet

Ortodontik tedavi gören yetişkin sayısındaki artışla birlikte, estetik avantajlarından dolayı şeffaf plaklara (hizalayıcılara) olan talep artmaktadır. Ortodontistlerin de klinik uygulamalarında şeffaf plakları daha fazla tercih etmeye başladıkları ve bu tercih edilirliğin her geçen gün artacağı öngörülmektedir. Üretici firmalar tarafından sürekli geliştirilen şeffaf plak sistemleriyle meydana gelen diş hareket mekanizmalarının ortodontistler tarafından anlaşılması; uygun vakaların seçilmesi, doğru tedavi planlaması yapılabilmesi ve diş hareketlerinin tahmin edilebilirliği açısından önemlidir. Ayrıca, şeffaf plakların üretim süreçleri, malzeme içerikleri, bazı fiziksel, mekanik ve optik özellikleri konusunda kapsamlı bilgiye sahip olunması, klinik uygulamalarda uygun sistemlerin seçiminde önemlidir. Bu derlemede, ortodontik tedavi amacıyla üretilen şeffaf plakların üretim süreçlerinden ve ülkemizde en sık kullanılanların içerikleri ile bazı fiziksel özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca şeffaf plakların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (sertlik, esneklik, kalınlık, dayanıklılık, yüzey pürüzlülüğü), optik özellikleri (şeffaflık ve renklenme) ve plaklarda meydana gelen su emilimi ile suda çözünme sorunları değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, şeffaf plakların bu özelliklerinin tedavi süreci açısından önemi ve bu özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler özetlenmiştir. Şeffaf plakların fiziksel, mekanik ve optik özelliklerinin ortodontistler tarafından anlaşılması ve iyi bilinmesinin, bu sistemlerin klinik kullanımının güvenle artmasında ve üretimlerinin geliştirilmesinde katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: **absorpsiyon; sertlik; şeffaf plak apareyleri**

Kaynak Göstermek İçin: Oğan C, Türköz Ç. Şeffaf Plakların (Hizalayıcıların) Fiziksel, Mekanik ve Optik Özellikleri. Acta Odontol Turc 2026;43(2):125-33

Makale gönderiliş tarihi: 26 Aralık 2024; Yayına kabul tarihi: 19 Şubat 2025
*İletişim: Uzm. Dr. Dt. Cansu Oğan,
Gazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ortodonti Anabilim Dalı, 06490, Ankara, Türkiye
E-posta: dt.cansu.buyuk@gmail.com

Editör: Nehir Canıgür Bavbek, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Yayın Hakkı: © 2026 Oğan ve Türköz. Bu eserin yayın hakkı Creative Commons Attribution License ile ruhsatlandırılmıştır. Sınırsız kullanım, dağıtım ve her türlü ortamda çoğaltım, yazarlar ve kaynağın belirtilmesi kaydıyla serbesttir.

Çıkar Çatışması: Bulunmamaktadır.

Giriş

Ortodontik tedavilerde, yüzyılı aşkın bir süredir ortodontistler tarafından metal braketler ve çeşitli özellikteki teller kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda, ortodontik tedavi gören yetişkin sayısındaki artışla birlikte, metal braketler yerine, görünürlüğü daha az olan lingual, seramik/kompozit braketler ve ortodontik tedavi amacıyla geliştirilen şeffaf plaklar (hizalayıcılar) gibi daha estetik görünümlü apareylere olan talep artmaktadır.[1,2] Özellikle, tanı ve tedavi planlamasında üç boyutlu görüntüleme ve ağız içi tarayıcıların kullanımının yaygınlaşmasıyla hem hastaların hem de ortodontistlerin, ortodontik tedavilerde şeffaf plakları daha fazla tercih etmeye başladıkları görülmektedir.[3,4] Bu tercih edilirliğin üretici firmaların dünya çapındaki pazarlama stratejileri, sosyal medya kanallarının kullanımı ile doğrudan potansiyel hastalara ulaşabilmesi gibi sebeplerden dolayı gitgide artacağı tahmin edilmektedir.[5,6]

Şeffaf plaklar, ortodontik tedavi amacıyla ilk olarak basit yer eksikliği veya fazlalığı vakalarında kullanılmaya başlanmıştır.[7] Kullanılan malzemelerin, diş hareketlerini simüle edildiği bilgisayar destekli programların, diş hareketine destek olan ataçmanların geliştirilmesi ve ortodontistlerin klinik tecrübelerinin artışıyla birlikte şeffaf plakların günümüzde kullanım endikasyonları oldukça genişlemiş, daha karmaşık vakaların tedavilerinde de tercih edilmeye başlanmıştır.[8,9] Şeffaf plak sistemleri birçok üretici firma tarafından günden güne geliştirilmeye devam edilse de öngörülen bazı diş hareketleriyle, klinik olarak meydana gelen diş hareketlerinin arasındaki tahmin edilebilirliğin ve tutarlılığın düşük olduğu görülmektedir.[10] Dolayısıyla ortodontistler tarafından şeffaf plaklarla meydana

© 2026 Oğan ve Türköz

gelen diş hareketi mekanizmalarının iyi bilinmesi; uygun vakaların seçilmesi, doğru tedavi planlaması yapılabilmesi, diş hareketlerinin tahmin edilebilir ve fizyolojik olması açısından oldukça önemlidir.[11] Aynı zamanda bu plakların üretim süreçleri, malzeme içerikleri, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi de klinikteki etkinliklerini artıracaktır.[12,13] Bu derlemede, ortodontik tedavi gerçekleştirmek amacıyla üretici firmalar tarafından üretilen şeffaf plakların üretim süreçleri, içerikleri, bazı fiziksel, mekanik ve optik özellikleri (şeffaflık, renklenme gibi) ile bu özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler özetlenmiştir.

Ortodontik Tedavi Amacıyla Kullanılan Şeffaf Plakların Üretimi ve İçeriği

Ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plaklar ısıtıldıklarında yumuşayıp şekillendirilebilen, soğuduklarında ise sertleşen ve aldığı şekli koruyan termoplastik polimerlerden üretilirler.[14] Termoplastik polimerler, güçlü molekül içi kovalent bağlara, zayıf moleküller arası Van der Waals bağlarına sahiptir. [15] Sıcaklık altında bu bağlar erir ve malzemenin istenilen şekilde bükülebilir olması sağlanır. Soğutulduğunda ise moleküler zincirler yeni şekillenmiş hâllerinde katılaşırlar. [14] Yani malzeme değişen sıcaklıklarda kimyasal bir değişime değil, yalnızca fiziksel bir değişime uğrar. Bu nedenle termoplastik malzemeler için ısıyla yumuşama ve soğumayla sertleşme tekrarlanabilir bir işlemdir.[16]

Günümüzde ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plaklar, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design (CAD)) ve bilgisayar destekli üretim (Computer Aided Manufacturing (CAM)) teknolojisinin kullanıldığı dijital bir iş akışı ile üretilir.[14] Dijital görüntü elde edilirken, direkt olarak hastadan ağız içi tarayıcı kullanılarak alınan veya indirekt olarak yüksek kaliteli polivinil siloksan ölçü malzemesiyle alınan ölçünün dijital olarak taranmasıyla elde edilen görüntüler kullanılır.[17] Böylece, CAD platformu üzerinde diş hareketlerinin sanal olarak yapılması ve tedavi planlamasının gerçekleştirilmesi mümkün kılınır.[18] Günümüzde pek çok şeffaf plak sisteminde, bilgisayarlı tomografi (Computed tomography (CT)) taramalarının da yüklenmesiyle, dişlerle birlikte diş köklerinin de dijital olarak görüntülenmesi mümkün olmaktadır.[17] Dişlerin konumu, istenilen son pozisyonu alacak şekilde sanal olarak düzenlenir. Böylece, her aşama için planlanan diş pozisyonuna sahip sıralı sanal modeller oluşturulur. Bu sanal modellerden, CAM teknolojisi kullanılarak üç boyutlu baskı tekniği ile seri fiziki modeller elde edilir.[19] Elde edilen seri modeller üzerinde vakumla ve ısıyla şekillendirme işlemi olan termoform ile seri şeklinde şeffaf plaklar hazırlanmaya başlanır.[17,20] Bir diğer yöntem ise, şeffaf plakların doğrudan üç boyutlu baskı ile hazırlanmasıdır.[21] Böylece, sanal modellerin fiziki olarak elde edilmesi ve plakların bu modeller üzerinde termoform ile şekillendirme gibi ara basamaklar atlanmış ve üretim daha hızlı hâle gelmiş olur. Bu şekilde, ısıyla şekillendirme işlemlerinin olumsuz etkilerinden kaçınılarak, daha hassas, uyumlu, etkin ve mekanik direnci yüksek plaklar üretilebilmektedir.[22]

Şeffaf plakların hazırlanmasında, üreticiler tarafından en sık kullanılan polimerler; polyester, poliüretan ya da kopolyester, polipropilen, polikarbonat, etilen vinil asetat ve polivinil klorürdür.[14,23] Polyesterler arasında da mükemmel mekanik ve optik özelliklerinden dolayı polietilen tereftalat (PET) ve polietilen tereftalat glikol (PET-G) yaygın olarak bu amaçla kullanılmaktadır.[5,22] Termoplastik polimerler, moleküler yapılarına göre amorf ve kristalin olarak sınıflandırılırlar.[5] PET'in, hem amorf hem de kristalin formları mevcut olup, bu form türleri malzeme özelliklerini etkilemektedir.[24] Amorf yapı, düzensiz bir şekilde sıralanan moleküler yapıya sahip olup plaklara yumuşaklık, şekillendirilebilirlik, şeffaflık, darbelere karşı direnç kazandırır. Kristalin yapının ise moleküler yapısı sıkı ve düzenlidir. Bu yapı, plaklara sertlik, opaklık, kimyasal direnç ve yüksek erime noktası gibi özellikler kazandırır.[5]

PET-G, PET'in yarı kristalin yapıdan amorf bir yapı hâline dönüştürülmüş formudur. [4] Dolayısıyla bu durum malzemeye daha şeffaf ve esnek bir yapı kazandırır. Sonuçta, PET-G geliştirilmiş mekanik ve şeffaflık gibi avantajlı özellikleri nedeniyle ağız içinde kullanılmak üzere en uygun malzeme olduğundan, üretici firmalar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir.[4] Termoplastik poliüretan (TPU), oldukça iyi mekanik ve elastomerik özellikler gösterir. Kimyasal ve aşınma direnci yüksek olan son derece esnek bir polimerdir. Yüke maruz kaldığında şekil değiştirir; yük kaldırıldığında ise orijinal şekline dönebilir.[25,26]

Ortodontik tedavide kullanılan şeffaf plaklar tek katmanlı poliüretan malzemeden ya da günümüzde çoğu ticari firmanın yaptığı gibi çok katlı malzemeden üretilmektedir. Çoğunlukla sert ve yumuşak katmanlar içeren şeffaf plaklarda, yumuşak katman plağın pürüzsüz bir şekilde yerleşmesini sağlayan esneklik özelliğini; sert katman ise dayanıklılığını verir.[27] Şeffaf plakların istenilen diş hareketlerini sağlayabilmeleri için sürekli ve kontrollü kuvvet üretebilmeleri gerekmektedir. Dolayısıyla mekanik ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesi için birçok üretici firma tarafından yapısına polyester, poliüretan, polipropilen katılmaktadır.[5]

Termoplastik malzemelerin içeriğinde bulunan farklı polimerler ve bunların oranları, fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.[12] Ülkemizde ortodontik tedavi amacıyla en sık kullanılan şeffaf plak markalarına ait plakların içerikleri, kalınlıkları ve firmalar tarafından belirtilen malzeme özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Şeffaf plakların üretiminde kullanılan termoplastik malzemelerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Bu malzemenin en büyük dezavantajı, strese maruz kaldıkça fiziksel, mekanik ve optik özelliklerinde meydana gelen deformasyonlardır.[33-35] Termoplastik materyallerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde zamanla meydana gelen olumsuz değişimler, şeffaf plakların uyguladığı ortodontik kuvvetlerde ve dişi hareket ettirme

© 2026 Oğan ve Türköz

Tablo 1. *Ülkemizde en sık kullanılan şeffaf plakların içerikleri, kalınlıkları ve üretici firmalar tarafından belirtilen bazı malzeme özellikleri*

Marka Adı (Üretici Firma)	Materyal Bileşimi	Materyal Kalınlığı	Üretim Şekli	Malzeme Özellikleri
Invisalign® (Align Teknoloji Inc, San Jose, ABD)	SmartTrack®: LD30 yapısı, metilen difenilden diizosiyanat, 1,6-heksandiol ve katkı maddelerinden oluşan çok katmanlı aromatik termoplastik poliüretan[28]	0.75 mm[5]	Isıyla ve vakumla şekillendirme[2]	LD30, 2013 yılından önceki üretimde kullanılan EX30'a kıyasla daha az kristalize yapıda olduğundan, görünümü daha şeffaftır. Ayrıca daha elastik yapıda olduğundan diş arkına daha iyi uyum sağladığı bildirilmiştir.[27]
Clear Correct® (Institut Straumann AG, Basel, İsviçre)	ClearQuartz: Zendura, poliüretan üç katmanlı bir malzemedir.[5]	0.75 mm[5]	Isıyla ve vakumla şekillendirme[29]	Plaklar, esnek iki tabaka arasında elastomerik bir tabaka içerir. Dış tabakalar, plakları sert hâle getirmek; iç tabaka, artırılmış elastikiyeti sayesinde sürekli bir kuvvet sağlamak üzere tasarlanmıştır.[30]
Orthero® (Scheu Dental GMBH, Almanya)	PET-G[31]	0.75 mm[31]	Isıyla ve vakumla şekillendirme[31]	Plaklar üç katmanlıdır. İki sert katman arasında elastomer çekirdekli daha esnek katman içerir.[31]
Clarity® (3M ESPE, Maplewood, ABD)	Clarity® Aligners (CA) Flex: Esnek 5 katmanlı kopolimer karışımı[32] Clarity® Aligners (CA) Force: Rijit 5 katmanlı kopolimer karışımı[32]	Flex: 0.625 mm[32] Force: 0.75 mm[32]	Isıyla ve vakumla şekillendirme[32]	CA Flex, CA Force materyaline göre daha esnektir. Üretici firma karmaşık diş hareketlerinin tedavisinde CA Flex ve CA Force kombinasyonunu önermektedir.[32]

özelliklerinde de azalmaya sebep olur.[34,36,37] Böylece meydana gelmesi planlanan diş hareketlerinin tahmini zorlaşır.[38] Materyalin yapısından dolayı, kullanıma bağlı şeffaflık kaybı, renklenme gibi optik özelliklerde meydana gelen değişimler de şeffaf plakların tercih edilebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.[33,35] Sonuç olarak, ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların üretiminde kullanılan malzemelerin fiziksel, mekanik ve optik özellikleri; klinik etkinliklerinde ve estetik görünümlerinde oldukça önemlidir.

Şeffaf Plakların Fiziksel, Mekanik ve Optik Özellikleri

İdeal bir şeffaf plak malzemesi yüksek elastikiyet, düşük sertlik, yeterli esneklik özelliklerine sahip olmalıdır.[13,14] Aynı zamanda çeşitli yüklere ve şekil bozulmalarına karşı dirençli, estetik olarak şeffaflık özelliği yüksek, renklenmeye dirençli ve biyouyumlu olmalıdır.[5] Ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların bazı fiziksel, mekanik ve optik özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

Sertlik ve Esneklik

Şeffaf plakların üretiminde kullanılan malzemelerin sertlik ve esneklik özelliklerini anlayabilmek için öncelikle elastik malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak gerekir. Elastik malzemeler sahip oldukları gerilme (stress) ve gerinme/şekil değiştirme (strain) eğrisinin içinde bir kuvvete maruz kaldıklarında, meydana gelen şekil değişimi uygulanan kuvvet ile doğru orantılıdır.[5] Elastik malzemeler, kendi gerilim-gerinme eğrisinin içinde uygulanan bu kuvvet ortadan kaldırıldığında orijinal boyut ve şekline döner ve buna ''stres-gevşeme fenomeni'' denir.[14] Ancak bu elastik özelliğinin bir sınırı vardır. Akma dayanımı (yield strength), bir malzemenin şekil değişikliğine uğramadan dayanabileceği en yüksek gerilme değerini ifade eder.[14] Bu değer aşıldıktan sonra elastik malzeme, kuvvet ortadan kaldırılsa bile kalıcı bir şekil değişikliğine uğrar. Elastisite (Young) modülü ise, bir malzemenin elastik sınırlar içinde gerilmeye bağlı olarak, gerinmesine yani şekil değiştirmesine olan oranını tanımlar.[16] Bu durum, termoplastik malzemelerin en önemli özelliği olup, malzemenin esnekliğini/sertliğini gösterir. Düşük bir kuvvetle kolayca şekil değiştiren bir malzeme, düşük elastisiteye sahiptir. Yüksek elastisite modülü ise, malzemenin daha sert olduğunu belirtir.[4]

Şeffaf plaklar viskoelastiktir. Yani hem elastik hem de akışkanlığı az olan bir sıvı gibi davranıp ''kısa'' süreli kuvvetlere maruz kaldıklarında, elastik gibi stres-gevşeme fenomenine göre hareket ederler. [14,16] Gerilme-gerinme eğrisinin içindeki, kısa süreli olarak uygulanan kuvvet ortadan kaldırıldığında orijinal boyut ve şekline dönebilirler. Ancak uygulanan kuvvetin süresi

© 2026 Oğan ve Türköz

uzadıkça, bu fenomene göre hareket etmeyip, gerilim ve gerinim arasında zamanla değişen bir 'viskoelastik' özellik gösterirler.[14] Bu da demektir ki viskoelastik malzemelere aynı yönde uygulanan yük, sabit kalsa bile malzemede şekil değişikliğine neden olabilir ve bu boyut kararsızlığı, viskoelastik malzemelerin önemli bir problemidir.[14,39] Dolayısıyla şeffaf plakların dişlere yerleştirilmesi sırasında meydana gelen ve devam eden kuvvetten ötürü, henüz planlanan diş hareketi başlamadan bile mekanik özelliklerinde değişim meydana gelebilir.[16,40] Şeffaf plakların bu özelliği yapılması beklenen diş hareketlerinin planlanmasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.5 Elastik malzemeler kalıcı şekil değişimine neden olmayan bir kuvvete maruz kaldıklarında, kuvveti emer ve kuvvet ortadan kaldırıldığında bu kuvveti geri verirler.[14] Viskoelastik bir malzeme olan şeffaf plaklar ise sabit bir kuvvete maruz kaldıklarında depoladıkları gerilim (stres), moleküler hareketlerinden dolayı zamanla azalır ve dolayısıyla geri verilen kuvvette de düşüş, yani stres gevşemesi meydana gelir.[34,41] Stres gevşemesi, muhtemelen şeffaf plakların verimliliğini belirlemede en önemli faktördür. Çünkü bu durum, sabit bir gerilme altında zamanla şeffaf plaklar tarafından dişlere uygulanan kuvvetin azalmasına neden olabilir.[16] Şeffaf plaklarda meydana gelen stres gevşemesi, malzeme özellikleri, ağız ortamındaki sıcaklık, fonksiyonel hareketler sırasında meydana gelen yük, malzemenin kalınlığı, sertliği gibi durumlardan oldukça etkilenir.[33,42] Sabit ortodontik tedavilerde kullanılan nikel-titanyum tellerin dişlere uyguladıkları kuvvetler haftalarca aktif kalırken [43], şeffaf plakların malzeme özelliğinden dolayı, kullanımlarından birkaç saat sonra bile uyguladıkları kuvvette düşüş olduğu bildirilmektedir.[10,16] Bu durum, ortodontik kuvvetlerin ve meydana gelmesi planlanan diş hareketlerinin tahminini oldukça zorlaştırmaktadır.[34,36,37] Görüldüğü gibi viskoelastik özellikler, şeffaf plaklara esneklik sağlamanın yanı sıra, stres altında zamanla mekanik özelliklerinde deformasyonlar görülmesi gibi dezavantajlara da neden olmaktadır.

Şeffaf plakların esnekliği, sertliği veya kalıcı olarak şekil değişikliğine (deformasyon) uğramasında sahip oldukları elastisite modülünün etkisi vardır.[15] Yüksek elastisite modülüne sahip bir şeffaf plak serttir. Sertlik, bir malzeme yüzeyinin uygulanan yüke karşı direncini gösteren mekanik bir özelliktir. Şeffaf plak malzemelerinin yüzey sertliğinin ölçülmesinde Vickers [39] veya Shore sertlik testi [15] gibi testler kullanılabilir. Bu testler genel olarak kullanılan cihazın ince uç kısmının belirlenen yük ve süre boyunca malzeme üzerine baskı uygulayarak girinti oluşturmasıyla gerçekleştirilir. Vickers testinde malzeme üzerinde meydana gelen mikro girintinin boyutları değerlendirilerek; Shore testinde ise malzemenin girinti oluşturulurken gösterdiği direnç değerlendirilerek sertlik ölçülmektedir.[15,39]

Şeffaf plakların malzeme sertliği; retansiyon, ağız ortamındaki aşınmaya karşı direnç ve dişe uygulanan kuvvetlerle direkt ilgili bir özelliktir.[36,39,44] Şeffaf plak malzemesinin sertliğinin artması, plakların çıkarılması veya takılması esnasında hastanın daha fazla zorlanmasına neden olabilir. Esnekliğinin artması ise, hastaya kullanım kolaylığı sağlasa bile dişleri hareket ettirecek kadar yeterli kuvvet üretilememesine yol açabilir.[14,15]

Şeffaf plaklar dişlere oturtulduklarında bir miktar elastik deformasyona uğrarlar ve zamanla, dişleri de beraberinde taşıyarak orijinal şekline dönmeye çalışırlar. Ancak, meydana gelen deformasyon, retansiyon kuvvetlerini aşarak plakların yerinden çıkmasına neden olacak kadar büyük olmamalıdır.[14] Bu durumun yaşanmaması için, şeffaf plaklar ile yapılmak istenen toplam diş hareketi, daha küçük aşamalara bölünerek gerçekleştirilir.[4]

Şeffaf plakların sertliği; kalınlık, ısıyla şekillendirme, polimer yapısı, polimerleşme süreci ve ağız içi ortamında kullanımı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.[38,39,45,46] Özetle, ideal bir şeffaf plak malzemesinin diş hareketlerini sağlayacak kuvvetleri oluşturabilmesi ve deforme olmadan kolayca çıkarılıp takılması için yeterli sertliğe ve esnekliğe sahip olması gerekir.[44,46,47]

Kalınlık

Şeffaf plakların, 0.5 mm ile 1.5 mm arasında değişen çeşitli kalınlıklarda üretilirler.[14] Şeffaf plakların kalınlığı, mekanik niteliklerini, dişlere uyguladıkları kuvvetin büyüklüğünü ve dolayısıyla performanslarını etkileyen başka bir fiziksel özelliktir.[14,48] Yapılan bir çalışmada[49], şeffaf plak üretiminde ısıyla şekillendirme sürecinde plak malzemesinin başlangıç kalınlığı, sertliği ve şeffaflığı gibi özelliklerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Dolayısıyla şeffaf plakların fiziksel, mekanik ve optik özellikleri tespit edilirken, değerlendirmelerin ısıyla şekillendirme işleminden sonra yapılması gerektiği bildirilmiştir.[15,49]

Gerçekleştirilen *in vitro* bir çalışmada[50] plakların ağız ortamında su absorpsiyonuna bağlı olarak kalınlıklarının arttığı bildirilmiştir. Başka bir *in vitro* çalışmada[51], 0.8 mm ve 1 mm kalınlığa sahip termoplastik plaklara 14 gün boyunca, günde 22 saat termal döngü işlemi uygulanmış; sonuçta olumsuz anlamda fiziksel ve mekanik değişimlerin 0.8 mm kalınlığındaki PET-G plakta daha fazla görüldüğü bildirilmiştir. Invisalign®'a ait şeffaf plakların ark boyunca farklı bölgelerde, farklı kalınlıklara sahip olduğunu gösteren bir çalışmada[52], plak kalınlığının, üretici firma tarafından ısıyla şekillendirme sonrası 0.75 mm olarak belirtildiği hâlde, kesici ve kanin bölgesinde 0.55 mm, molar bölgede 0.62 mm olduğu belirtilmiştir. Şeffaf plak kalınlığının konik ışınlı bilgisayarlı tomografi taramaları ile ölçüldüğü bir araştırmada[53], plak kalınlığı arttıkça dişler üzerinde oluşan geriliminin de arttığı bildirilmiştir. Aynı araştırmada ön dişlerin retraksiyonu için en uygun plak kalınlığının 0.75 mm ile 0.85 mm arasında olduğu; 1.05 mm ile 1.15 mm kalınlığındaki plakların, kök rezorpsiyonu ve periodontal doku hasarına yol açabileceği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada[54], Invisalign®'a ait şeffaf plakların kesici, kanin ve

© 2026 Oğan ve Türköz

molar bölgedeki tüm yüzeylerdeki kalınlığı yüksek çözünürlüklü mikro CT ile ölçülmüş, plak kalınlığının tüm bölgelerde aynı olmadığı; ancak bu farklılığın istatistiksel olarak anlamlı kabul edilemeyeceği bildirilmiştir. Aynı çalışmada plak kalınlığının yalnızca molar dişlerin gingivolingual yüzeyinde, oklüzal yüzeye göre anlamlı şekilde daha ince olduğu gösterilmiştir. Bu durumun, özellikle molar bölgelerde, diş hareketinin öngörülebilirliğini azaltan bir olumsuzluğa yol açabileceği bildirilmiştir. Dolayısıyla, ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plak dizisinde sıra sayısı arttıkça, kuvvet iletimiyle ilgili, gerinime bağlı olarak düşüş olabileceğinden, dizinin sonuna doğru plakların daha kalın üretilmesi ve daha uzun süre takılması gerektiği tavsiye edilmiştir.[55]

Dayanıklılık ve Aşınma Direnci

Şeffaf plak malzemesi ağız ortamına dayanıklı olmalı ve çiğneme, konuşma, yutkunma gibi fonksiyonel ya da bruksizm gibi parafonksiyonel kuvvetlere karşı yüksek aşınma direncine sahip olmalıdır. Ağız içindeki bu etkiler şeffaf plakların belirli bölgelerinde yoğunlaşıp, malzemede mikroskobik çatlaklar oluşmasına ve zamanla yıpranmasına neden olabilir.[34] Malzemenin aşınması, plakların klinik performansını olumsuz etkileyen durumlara yol açabilir.[14]

Ağız içinin kimyasal ortamı, şeffaf plakların dayanıklılığını etkileyen önemli bir etkendir. Tükürüğün pH seviyesi, gıda ve içeceklerin asidik veya bazik yapısı, malzemenin dayanıklılığını ve aşınma direncini olumsuz etkileyebilir. Özellikle, asidik yiyecek ve içecekler, poliüretan malzemelerde hidrolitik bozulmaya neden olabilir.[56] Polieter bileşiklerin, neme karşı poliüretanlardan daha dirençli olduğu, ancak düşük aşınma direncine sahip olup, daha kolay yırtılabildiği bildirilmiştir.[36] Bu da demektir ki, termoplastik poliüretanlar aşınma direnci bakımından polieter bileşiklere göre daha üstündür. Poliüretan içeren termoplastik malzemeler, bruksizmin yol açtığı gibi yüksek kuvvetlere karşı dayanıklı olup, uzun süreli kullanımlarda bile şekillerini koruyabilmektedirler.[57]

Şeffaf plakların aşınma dirençlerinin değerlendirilmesinde farklı test yöntemleri kullanılabilir. In vitro testlerde, simüle edilmiş çiğneme döngüleri ve yüzey aşındırma testleri, malzemenin uzun süreli dayanıklılığını ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.[34] Sonuç olarak, yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci, ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların klinik etkinliklerinin de yüksek olmasını sağladığından, sahip olunması istenen önemli fiziksel ve mekanik özelliklerdendir.

Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, bir malzeme yüzeyinin ne derece düzgün veya pürüzlü olduğunu belirten fiziksel bir özelliktir.[58] Ağız ortamındaki çiğneme, konuşma gibi fonksiyonel kuvvetler ve hasta tarafından gerçekleştirilen temizlik prosedürleri, şeffaf plakların yüzeyinde aşınmalara, dolayısıyla pürüzlülüğün artışına yol açabilir.[42,59] Şeffaf plakların yüzey pürüzlülüğünün artması, plak ve sıvı birikimini kolaylaştırarak plakların uyumunu ve mekanik etkinliğini, dolayısıyla klinik başarısını olumsuz etkileyebilir. Buna ek olarak, yiyecek ve içeceklerdeki renklendirici pigmentlerin plak yüzeyine daha kolay tutunmasına ve görünür ışığın plak yüzeyinde dağılmasında artışa neden olur ki, bu da plakların şeffaflığının azalmasına ve renklenmesine yol açar.[60] Şeffaf plakların üretimi sırasında ısıyla şekillendirme işlemi sonrasında bile, şeffaf plak malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün ilk hâline göre arttığı bildirilmiştir.[61] Bu nedenle, ısıyla şekillendirme işleminin optimize edilmesi, malzeme seçiminde pürüzsüzlük ve aşınma direncinin yüksekliği gibi kriterlerin göz önünde bulundurulması, şeffaf plakların klinik performansı ve estetik özellikleri açısından oldukça önemlidir.

Şeffaf plaklar gibi termoplastik bir malzemenin yüzey pürüzlülüğünün incelenmesinde, mekanik profilometre, optik profilometre veya atomik force mikroskobu (AFM) gibi yüzey ölçüm cihazları kullanılabilir.[45,62] Aynı zamanda daha detaylı yüzey görünümü değerlendirilmesi amacıyla, mikro düzeyde yüzey görünümü veren taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy (SAM)) kullanılabilir.[62]

Su Absorpsiyonu (Emilim) ve Suda Çözünme

Şeffaf plaklar hastalar tarafından kullanıldıkları süre boyunca tükürük ve tükürük içerisindeki enzimlere devamlı maruz kalırlar. Zaman geçtikçe şeffaf plak içerisinde bulunan polimer grubundaki serbest karboksil grupları, tükürükteki H iyonları ile etkileşime girer. Böylece polimer geri dönülemez bir şekilde hidrolitik bozulmaya, yani hidrolize uğramış olur. [14] Şeffaf plakların yapısındaki polimerin, tükürükteki suyu absorbe ederek şişmesine ‘‘higroskopik genleşme’’ denir.[14,63] Bu durum şeffaf plak boyutunda değişiklik meydana getirerek, uyumunun bozulmasına, üretilen kuvvette öngörülebilirliğin azalmasına ve estetik görünümde bozulmaya sebep olabilir.[45,64,65]

Yüksek moleküler yoğunluklara sahip kristalin yapıdaki termoplastikler düşük su emilim oranları gösterirken, kristalin bölgeleri olmayan amorf termoplastik malzemelerin, büyük serbest hacim nedeniyle daha yüksek su emilim oranları gösterdiği bildirilmiştir.[50] Örneğin, PET-G kristalin yapıda olmayan amorf bir polimer olup, yarı kristalin polimerlere kıyasla daha yüksek su emilimi gösterir.[24] Şeffaf plaklarda meydana gelen su emiliminin poliüretan yapıda yapısal değişikliklere neden olarak, plastikleştirici etki sağladığı, böylece sertlikte ve çatlak direncinde azalmaya neden olabileceği bildirilmiştir.[64] Oluşan mikroçatlaklar, hizalayıcının uyumunu etkileyip, uyguladığı kuvvetin azalmasına yol açabilir.[50,62] Ayrıca zaman geçtikçe daha da artan su emiliminde, tükürükte bulunan pigmentler de emilmekte ve mikroçatlaklardan malzeme yüzeyine bağlanmaktadırlar.[50,66] Bu durum şeffaf plakların şeffaflığında azalmaya ve renklenmesine sebep olmaktadır.[42]

© 2026 Oğan ve Türköz

Sonuç olarak, ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların hidrolize ve sıvılara karşı dirençli olması, düşük su absorpsiyonu gerçekleştirmesi istenilen fiziksel özelliklerdendir.[14,63] Şeffaf plakların ağız ortamında düşük su emilimi göstermesinin yanı sıra, çözünmeye karşı da dirençli olması önemlidir. Bazı şeffaf plakların çeşitli oranlarda hazırlanan etanol-su çözeltisinde bekletilip, meydana gelen çözünmenin değerlendirildiği *in vitro* bir çalışmada[67], yüksek etanol içeren çözeltide bekletilen plaklarda daha fazla çözünme meydana geldiği görülmüştür. Aynı çalışmada, çözünme sonrasında çözeltiler incelendiğinde, Benzene, 1,3-bis (1,1-dimetiletil) bileşiğinin, çalışmada değerlendirilen tüm şeffaf plaklarda bulunan ortak bir kimyasal olduğu, Bisfenol A'nın ise hiçbirinde tespit edilmediği bildirilmiştir.

Şeffaf plaklarda meydana gelen su absorpsiyon miktarı, $(m_2-m_3)/V$ formülü kullanılarak $\mu g/mm^3$ cinsinden hesaplanır.[49] Bu formülde m_2, plakların suda bekletilip su absorpsiyonu meydana geldikten sonraki ağırlığı; m_3, plakların tamamen kurutulduktan sonraki ağırlığı; V, değerlendirilen şeffaf plağın hacmidir. Meydana gelen suda çözünme miktarı ise $(m_1-m_3)/V$ formülü kullanılarak $\mu g/mm^3$ cinsinden bulunur. Bu formülde m_1, şeffaf plağın suda bekletilmeden önceki ilk ağırlığıdır.[49] Ancak halihazırda üretici firmalar tarafından üretilmiş bir şeffaf plak hacminin belirlenmesinde yaşanan zorluktan dolayı, su emilimi veya suda çözünme değerlendirmesi, şeffaf plaklarda meydana gelen ağırlık artışının/azalmasının başlangıç ağırlıklarına oranlanarak belirlenmesiyle de yapılabilmektedir.[50]

Optik Özellikler

Ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların, hastalar tarafından kabul oranını artıran ve gittikçe popülerleşmesini sağlayan en önemli özelliği estetik görünümleridir.[68] Şeffaf plakların ışık geçirgenliğinin %80 olmasının estetik olarak ideal bir şeffaflık sağlayacağı bildirilmiştir.[35] Şeffaf plakların şeffaflığını belirleyen ışığı geçirme ve absorbe etme değerleri, plakların üretiminde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi tarafından belirlenir.[35,69] Amorf yapıdaki polimerler, yüksek oranda yarı saydamlık sağladıkları için şeffaf plak materyali olarak tercih edilirler. Kristalin yapıdaki polimerler ise oldukça opak olup, görünümleri estetik değildir. Poliüretan, polyester, polivinilklorür, polisülfon ve polikarbonat, şeffaf plak imalatına uygun, estetik optik özellikler sergileyen polimer malzemelerden bazılarıdır.[68]

Şeffaf plakların kullanıldıkları sürece şeffaflıklarını korumaları, renklenmemeleri estetik açıdan oldukça önemli bir kriterdir.[5] Ortodontistler tarafından hastalara herhangi bir şey yiyip içerken plaklarını çıkarmaları söylenir. Genellikle hastaların, ortodontistlerin önerisine uymayıp şeffaf plakları takılıyken yiyecek ve içecek tükettikleri bildirilmiştir.[68,70] Bu şekilde davranan hastaların plaklarında renk değişikliğinin görülmesi, şeffaf plakların yapısında bulunan poliüretanın, ağız ortamındaki yiyecek ve içeceklerin pigmentlerinin emilimine duyarlı olmasındandır. Şeffaf plakların kullanımı sırasında renklenmeye sebep olacak içecek veya yiyecek tüketmeyen hastaların plaklarında bile sıcaklık, nem, çiğneme kuvvetlerindeki değişiklikler, ağız ortamındaki tükürük enzimleri, kromojenik bakteriler, oluşan mikroçatlaklar gibi sebeplerle zamanla şeffaflığını kaybettiği bildirilmiştir.[33,35]

Şeffaf plaklarda meydana gelen renk değişikliklerinin, pigment birikimini hızlandırabilecek pürüzlülük gibi malzemelerin yüzey özelliklerine bağlı olduğu düşünülebilir.[71] Ancak yüzey pürüzlülüğü ve renk değişikliği arasında çok zayıf bir ilişki olduğu, renk değişikliğinin yalnızca yüzey özelliği etkisiyle değil, aynı zamanda pigmentlerin malzemenin içine nüfuz etmesiyle de meydana geldiği bildirilmiştir.[62] Sonuç olarak şeffaf plakların üretiminde kullanılan malzemeler, her ne kadar yüksek optik özelliklere sahip olsalar da pigment absorpsiyonu veya pigmentlerin malzeme yüzeyine nüfuz etmesi ile şeffaflıklarını kaybedip, renklenebilirler.[34,62] Şeffaf plaklarda meydana gelen renk değişimleri ve şeffaflık kaybı gibi optik özellikler, spektrofotometre cihazları ile ölçülüp değerlendirilebilir.[33,68]

Şeffaf plakların, yalnızca kullanımları esnasında değil, üretimleri sırasında bile ısıyla şekillendirme işleminden dolayı, sıcaklık, basınç ve çalışma süresi ile ilişkili olarak amorf yapıdan kristalin yapılara dönüşüm nedeniyle şeffaflığının azaldığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır.[49,53,62] Dolayısıyla şeffaf plakların optik özellikleri tespit edilirken, diğer özelliklerinde olduğu gibi, değerlendirmenin ısıyla şekillendirme işlemi sonrasında yapılması tavsiye edilir.[15,49]

Isıyla şekillendirilen Clear Correct® ve Invisalign® firmalarına ait şeffaf plaklar ile üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen Tera Harz TC85 (Graphy, Seul, Güney Kore) ve Clear-A (Senertek, İzmir, Türkiye) şeffaf plakların renk stabilitesinin değerlendirildiği bir çalışmada[29], plaklar kahve, siyah çay, kola ve enerji içeceği gibi bazı içeceklere maruz bırakılmıştır. Sonuçta, en az renk değişikliğinin Clear Correct® firmasına ait şeffaf hizalayıcılarda; en fazla renklenmenin ise Tera Harz TC85'e ait şeffaf plaklarda meydana geldiği; kahvenin ise şeffaf plaklarda en fazla renklenmeye neden olan içecek olduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen şeffaf plaklarda, termoform yöntemiyle üretilenlere kıyasla daha fazla renk değişimi görüldüğü bildirilmiştir.

Zamanla meydana gelen renklenme ve şeffaflık kaybı hem ortodontistler hem de hastalar açısından olumsuz bir etkiye yol açmaktadır. Dolayısıyla şeffaf plak üretiminde kullanılan malzemelerin, ısıyla şekillendirilmeden önce ve sonrasında yüksek şeffaflığa sahip olması önemli bir optik avantajdır.[33] Aynı zamanda ağız ortamında bulunan kimyasal bileşiklere karşı yüksek dayanıklılığa sahip olması ve düşük su emilimi özelliği göstermesi, renk stabilitesi ve şeffaflığın uzun süre korunmasında yardımcı olmaktadır.[56,57]

© 2026 Oğan ve Türköz

Sonuç

Ortodontik tedavi amacıyla kullanılan şeffaf plakların fiziksel, mekanik ve optik özellikleri ile ilgili gerçekleştirilen *in vitro* ve klinik araştırmalar, bu sistemlerin üretici firmalar tarafından geliştirilmesi açısından katkı sağlayacağından, en az diş hareket etkinliklerinin incelendiği araştırmalar kadar önemlidir. Şeffaf plakların fiziksel, mekanik ve optik özelliklerinin ortodontistler tarafından anlaşılması ve üretici firmalar tarafından bu özelliklerin geliştirilmesi, bu sistemlerin halihazırda artış gösteren klinik kullanımlarını güvenle artıracak, refinement (düzeltme) amacıyla üretilen plak sayısını düşürecektir. Dolayısıyla bu gelişmeler, ortodontistlere klinik açıdan zaman kazandırmasının yanı sıra, daha az sayıda şeffaf plak atığının doğaya salınmasını sağlayacaktır.

Kaynaklar

1. Ziuchkovski JP, Fields HW, Johnston WM, Lindsey DT. Assessment of perceived orthodontic appliance attractiveness. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2008;133:68-78.

2. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. Aust Dent J 2017;62:58-62.

3. Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, *et al*. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: Effect of treatment design. Prog Orthod 2023;24:1-12.

4. Shah S. Clear aligners: An update. EAS J Dent Oral Med 2020;2:160-4.

5. Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, *et al*. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater 2023;22:384-403.

6. Hussain SR, Jiang SS, Bosio JA. Generational perspectives of orthodontists in the U.S. and Canada: a survey study. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2022; 162:824-38.

7. Chang MJCC, Chang CY, Lin JSY, Chang CH, Roberts WE. Introduction to Invisalign® Smart Technology: Attachments design, and recall-checks. J Digit Orthod 2019;54:80-95.

8. Ke Y, Zhu Y, Zhu M. A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. BMC Oral Health 2019;19:24-34.

9. Kanpittaya P, Changsiripun C, Jaruprakorn T, Komolpis R, Chengprapakorn S, Laoamata V, *et al*. Clear aligner: Effectiveness, limitations and considerations. Dent Assoc Thai 2021;71:231-6.

10. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. Angle Orthod 2015;85:881-9.

11. Drake CT, McGorray SP, Dolce C, Nair M, Wheeler TT. Orthodontic tooth movement with clear aligners. ISRN Dent 2012;2012:1-7.

12. Zhang N, Bai Y, Ding X, Zhang Y. Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics. Dent Mater J 2011;30:954-9.

13. Ma YS, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res 2016;19:43-8.

14. Gold BP, Siva S, Duraisamy S, Idaayath A, Kannan R. Properties of orthodontic clear aligner materials: A review. J Evol Med Dent Sci 2021;10:3294-300.

15. Al Noor HSS, Al-Joubori SK. Comparison of the hardness and elastic modulus of different orthodontic aligners' materials. Int J Med Res Pharm Sci 2018;5:19-25.

16. Lombardo L, Martines E, Mazzanti V, Arreghini A, Mollica F, Siciliani G. Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour *in vitro* study. Angle Orthod 2017;87:11-8.

17. Hartshorne J, Wertheimer MB. Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2022;2:311-24.

18. Hirani S, Patel U, Patel N. Invisible orthodontics: a review. IOSR J Dent Med Sci 2016;15:56–62.

19. Pacheco-Pereira C, Brandelli J, Flores-Mir C. Patient satisfaction and quality of life changes after Invisalign treatment. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2018;153:834–41.

20. Macri M, Murmura G, Varvara G, Traini T, Festa F. Clinical performances and biological features of clear aligners materials in orthodontics. Front Mater 2022;9:819121.

21. Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, Saber SS, Seyedi M, Ghanavati S, *et al*. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: printing techniques, materials, and applications. Acta Biomater 2021;122: 26–49.

22. Rajasekaran A, Chaudhari PK. Integrated manufacturing of direct 3D-printed clear aligners. Front Dent Med 2023;3:1089627.

23. Condo R, Mampieri G, Giancotti A, Cerroni L, Pasquantonio G, Divizia A, *et al*. SEM characterization and ageing analysis on two generations of invisible aligners. BMC Oral Health 2021:21;316.

24. Dupaix RB, Boyce MC. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). Polymer 2005;46:4827-38.

25. Latko-Durałek K, Dydek A, Boczkowska A. Thermal, rheological and mechanical properties of PETG/rPETG blends. J Polym Environ 2019;27:2600-6.

26. Yu X, Li G, Zheng Y, Gao J, Fu Y, Wang Q, *et al*. Invisible orthodontics by polymeric clear aligners molded on 3D-printed personalized dental models. Regen Biomater 2022;9:rbac007.

27. Condo R, Pazzini L, Cerroni L, Pasquantonio G, Pecora A, Mussi V, *et al*. Mechanical properties of two generations of teeth aligners: change analysis during oral permanence. Dent Mater J 2018;37:835-42.

28. Bräscher AK, Zuran D, Feldmann RE Jr, Benrath J. Patient survey on Invisalign® treatment comparing the SmartTrack® material to the previous aligner material. J Orofac Orthop 2016;77:432-8.

29. Simunovic L, Cekalovic Agovic S, Maric AJ, Bacic I, Klaric E, Uribe F, *et al*. Color and chemical stability of 3D-printed and thermoformed polyurethane-based aligners. Polymers (Basel) 2024;16:1067.

30. ClearCorrect. ClearCorrect aligners: ClearQuartz tri-layer material [Internet]. ClearCorrect Support; 2024 [cited 2025 Feb 07]. Available from: https://support.clearcorrect.com/hc/en-us/articles/4410091639063-ClearCorrect-Aligners-ClearQuartz-Tri-layer-Material

31. Orthero. Aligner material [Internet]. Orthero Aligner; 2024 [cited 2025 Feb 09]. Available from: https://ortheroaligner.com/aligner-material/

32. Clarity Aligners. Available online [Internet]. 3M Orthodontics; [cited 2025 Feb 09]. Available from: https://www.3m.com/3M/en_US/orthodontics-us/featured-products/clarity-eos/

33. Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G. Optical properties of orthodontic aligners: Spectrophotometry analysis of three types before and after aging. Prog Orthod 2015;16:1-8.

34. Fang D, Zhang N, Chen H, Bai Y. Dynamic stress relaxation of orthodontic thermoplastic materials in a simulated oral environment. Dent Mater J 2013;32:946-51.

35. Zafeiriadis AA, Karamouzos A, Athanasiou AE, *et al*. An *in vivo* spectrophotometric evaluation of Vivera and Essix clear thermoplastic retainer discolouration. Australas Orthod J 2018;34:3-10.

36. Kohda N, Iijima M, Muguruma T, Brantley WA, Ahluwalia KS, Mizoguchi I. Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances. Angle Orthod 2013;83:476-83.

37. Ranjan A, Biradar AK, Patel A, Varghese V, Pawar A, Kulshrestha R. Assessment of the mechanical properties of three commercially available thermoplastic aligner materials used for orthodontic treatment. Iran J Orthod 2020;15:e116573.

38. Bradley T G, Teske L, Eliades G, Zinelis S, Eliades T. Do the mechanical and chemical properties of Invisalign™ appliances change after use? A retrieval analysis. Eur J Orthod 2016;38:27-31.

© 2026 Oğan ve Türköz

39. Alhendi A, Khounganian R, Ali R, Syed SA, Almudhi A. Structural conformation comparison of different clear aligner systems: An *in vitro* study. Dent J 2022;10:73.

40. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2009;135:27-35.

41. Abdallah MN, Lou T, Retrouvey JM, Suri S. Biomaterials used in orthodontics: brackets, archwires, and clear aligners. Adv Dent Biomater 2019;541-79.

42. Tamburrino F, D'Antò V, Bucci R, Alessandri-Bonetti G, Barone S, Razionale AV. Mechanical properties of thermoplastic polymers for aligner manufacturing: *In vitro* study. Dent J (Basel) 2020;8:47.

43. Proffit WR, Fields HW, Larson BE, Sarver DM. Ortodontik kuvvet kontrolünde mekanik prensipler. In: Larson BE, Proffit WR, editors. Güncel ortodonti. Translated by Varlık SK. 6th ed. Ankara: Ankara Nobel Tıp Kitabevleri; 2021. p. 276-92.

44. Cowley DP, Mah J, O'Toole B. The effect of gingival-margin design on the retention of thermoformed aligners. J Clin Orthod 2012;46:697-702.

45. Papadopoulou AK, Cantele A, Polychronis G, Zinelis S, Eliades T. Changes in roughness and mechanical properties of Invisalign® appliances after one- and two-weeks use. Materials 2019;12:2406.

46. Fang D, Li F, Zhang Y, Bai Y, Wu BM. Changes in mechanical properties, surface morphology, structure, and composition of Invisalign material in the oral environment. Am J Orthod Dentofac Orthop 2020;157:745-53.

47. Srinivasan B, Padmanabhan S, Srinivasan S. Comparative evaluation of physical and mechanical properties of clear aligners: a systematic review. Evid Based Dent 2024;25:53.

48. Edelmann A, English JD, Chen SJ, Kasper FK. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2020;158:91-8.

49. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. Korean J Orthod 2018;48:316.

50. Ryokawa H, Miyazaki Y, Fujishima A, Miyazaki T, Maki K. The mechanical properties of dental thermoplastic materials in a simulated intraoral environment. Orthod Waves 2006;65:64-72.

51. Dalaie K, Fatemi SM, Ghaffari S. Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. Prog Orthod 2021;22:15.

52. Lombardo L, Palone M, Longo M, Arveda N, Nacucchi M, De Pascalis F, *et al.* MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: An in-vitro study. Prog Orthod 2020;21:12-24.

53. Alhasyimi AA, Ayub A, Farmasyanti CA. Effectiveness of the attachment design and thickness of clear aligners during orthodontic anterior retraction: Finite element analysis. Eur J Dent 2024;18:174-81.

54. Mantovani E, Parrini S, Coda E, Cugliari G, Scotti N, Pasqualini D, *et al.* Micro computed tomography evaluation of Invisalign aligner thickness homogeneity. Angle Orthod 2021;91:343-8.

55. Vardimon AD, Robbins D, Brosh T. In-vivo von Mises strains during Invisalign treatment. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2010;138:399-409.

56. Li W, Wang S, Zhang Y. The effectiveness of Invisalign appliance in extraction cases using the ABO model grading system: A multicenter randomized clinical trial. Int J Clin Exp Med 2015;8:8276-82.

57. Schuster S, Eliades G, Zinelis S, Eliades T, Bradley TG. Structural conformation and leaching from *in vitro* aged and retrieved Invisalign appliances. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2004;126:725-8.

58. Schubert A, Wassmann T, Holtappels M, Kurbad O, Krohn S, Bürgers R. Predictability of microbial adhesion to dental materials by roughness parameters. Coatings 2019;9:456.

59. Can E, Panayi N, Polychronis G, Papageorgiou SN, Zinelis S, Eliades G, *et al.* In-house 3D-printed aligners: effect of *in vivo* ageing on mechanical properties. Eur J Orthod 2022;44:51-5.

60. Wu Z, Tian J, Wei D, Zhang Y, Lin Y, Di P. Effects of thickness and polishing treatment on the translucency and opalescence of six dental CAD-CAM monolithic restorative materials: An *in vitro* study. BMC Oral Health 2023;23:579.

61. Staderini E, Chiusolo G, Guglielmi F, Papi M, Perini G, Tepedino M, *et al.* Effects of thermoforming on the mechanical, optical, chemical, and morphological properties of PET-G: *In vitro* study. Polymers 2024;16:203.

62. Porojan L, Vasiliu RD, Porojan SD, Bîrdeanu MI. Surface quality evaluation of removable thermoplastic dental appliances related to staining beverages and cleaning agents. Materials 2020;12:1736.

63. Androsch R, Wunderlich B. The link between rigid amorphous fraction and crystal perfection in cold-crystallized poly(ethylene terephthalate). Polymer 2005;46:12556-66.

64. Eliades T, Bourauel C. Intraoral aging of orthodontic materials: The picture we miss and its clinical relevance. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2005;127:403-12.

65. Lu H, Roeder LB, Lei L, Powers JM. Effect of surface roughness on stain resistance of dental resin composites. J Esthet Restor Dent 2005;17:102-8.

66. Hodge RM, Edward GH, Simon GP. Water absorption and states of water in semicrystalline poly(vinyl alcohol) films. Polymer 1996;37:1371-6.

67. Alhendi A, Khounganian R, Almudhi A, Ahamad SR. Leaching of different clear aligner systems: An *in vitro* study. Dent J 2022;10:27.

68. Liu CL, Sun WT, Liao W, Lu WX, Li QW, Jeong Y, *et al.* Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents. Int J Oral Sci 2016;8:246-53.

69. Talic NF, Almudhi AA. The effect of dietary pigmentation on the esthetic appearance of clear orthodontic elastomeric modules. J Orthod Sci 2016;5:70-3.

70. Bernard G, Rompré P, Tavares JR, Montpetit A. Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods. Head Face Med 2020;16:2.

71. Jindal P, Juneja M. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2019;156:694-701.

Physical, mechanical, and optical properties of clear aligners

Abstract

The increasing number of adults seeking orthodontic treatment, owing to their aesthetic advantages, has led to a growing demand for clear aligners. Orthodontists are increasingly opting for clear aligners in their clinical practices, and this preference is predicted to grow further over time. A thorough understanding of the tooth movement mechanisms facilitated by continuously advancing clear aligner systems is important for orthodontists in selecting suitable cases, developing accurate treatment plans, and ensuring the predictability of tooth movements. Furthermore, a comprehensive understanding of the production processes, material compositions, and specific physical, mechanical, and optical properties of clear aligners is critical for the informed selection of appropriate systems in clinical practice. This review examines the production processes of clear aligners intended for orthodontic treatment, along with the composition and specific physical properties of those most commonly used in our country. Additionally, the physical and mechanical properties of clear aligners (hardness, flexibility, thickness, durability, and surface

© 2026 Oğan ve Türköz

roughness), their optical properties (transparency and discoloration), as well as water absorption and solubility issues, are discussed. Moreover, the importance of these properties of clear aligners in the treatment process and the methods used to evaluate them are summarized. It is anticipated that orthodontists' understanding and thorough knowledge of the physical, mechanical, and optical properties of clear aligners will contribute to the safer expansion of their clinical use and the improvement of their production processes.

Keywords: Absorption; clear aligner appliances; hardness

© 2026 Oğan ve Türköz