

Farklı Şeffaf Plak Materyallerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Ayşegül URAL ÖZAY*, Gülnaz MARŞAN**, Bülent AYDEMİR***

Öz

Amaç: Şeffaf plak tedavisinin başarılı olabilmesi için, plak materyalinin çevre periodontal dokulara zarar vermeden istenilen diş hareketlerini yaptırabilecek yeterli ortodontik kuvveti sağlaması gerekmektedir. Şeffaf plakların malzemesinin mekanik özellikleri üretilen ortodontik kuvvet için kritik bir role sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, farklı şeffaf plak materyallerinin ortodontik kuvveti etkileyebilecek mekanik özelliklerinin değişimlerinin tespiti ve etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın sıfır hipotezi, termoplastik malzemelerden elde edilmiş farklı şeffaf plak materyallerinin farklı mekanik özellikler göstermesi sebebiyle CA Pro, GT Flex, Zendura Flex, Zendura, Taglus ve GT Pro plak materyallerinin mekanik özelliklerinin incelenmesidir.

Yöntem: Çalışmada 6 farklı şeffaf plak materyalinin (CA Pro, GT Flex, Zendura Flex, Zendura, Taglus, GT Pro) mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ilgili standartlara uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi sonuçlarından materyellerin gerilme uzama eğrilerinin yanında elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması parametreleri elde edilmiştir. Sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve materyellerin mekanik özellikleri yorumlanmıştır.

Bulgular: Materyal türlerine göre elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması ölçümleri istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermiştir ($p=0,001$; $p<0,01$). Yapılan ikili karşılaştırmalar değerlendirildiğinde en düşük elastisite modülü ve çekme dayanımı değerine Zendura Flex materyalinin sahip olmasının istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç: Çalışmanın sonuçlarına göre çok katmanlı yapıda olan Zendura Flex ve CA Pro materyalleri, en düşük elastisite modülü ve bu sonucu destekleyecek şekilde en düşük çekme dayanımı değerleri göstermiştir. Çalışmanın sonuçları farklı şeffaf plak materyallerinin farklı mekanik özellikler gösterdiğini desteklemiştir. Şeffaf plak tedavisinin başarısını arttırmak amacıyla plak materyalleri mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi ile uygun plak materyallerinin belirlenebileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ortodonti, poliüretanlar, esneklik.

Özgün Araştırma Makalesi (Original Research Article)

Geliş / Received: 07.06.2022 & **Kabul / Accepted:** 25.10.2022

DOI: <https://doi.org/10.38079/igusabder.1125164>

* Diş Hekimi, E-posta: aysegulural07@gmail.com [ORCID https://orcid.org/0000-0003-0995-5324](https://orcid.org/0000-0003-0995-5324)

** Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ortodonti ABD, İstanbul, Türkiye.

E-posta: marsang@istanbul.edu.tr [ORCID https://orcid.org/0000-0003-3278-3372](https://orcid.org/0000-0003-3278-3372)

*** Doç. Dr., TÜBİTAK UME, Kocaeli, Türkiye. E-posta: bulent.aydemir@tubitak.gov.tr [ORCID https://orcid.org/0000-0001-6848-2681](https://orcid.org/0000-0001-6848-2681)

Investigation of the Mechanical Properties of Different Clear Aligner Materials

Abstract

Aim: In order for the clear aligner treatment to be successful, the aligner material must provide sufficient orthodontic force to make the desired tooth movements without damaging the surrounding periodontal tissues. It is known that the mechanical properties of the material of the clear aligners have a critical role in the orthodontic force produced. In this study, it is aimed to determine the changes in the mechanical properties of different aligner materials that may affect the orthodontic force and to examine their effects.

Method: In this study, tensile tests were performed in accordance with the relevant standards in order to determine the mechanical properties of 6 different clear aligner materials (CA Pro, GT Flex, Zendura Flex, Zendura, Taglus, GT Pro). From the tensile test results, the parameters of the elastic modulus, tensile strength and elongation at break were obtained, as well as the stress-strain curves of the materials. The results were statistically evaluated and the mechanical properties of the materials were interpreted.

Results: According to material types, elastic modulus, tensile strength and elongation at break measurements showed statistically significant differences ($p=0.001$; $p<0.01$). When the paired comparisons were evaluated, it was determined that the Zendura Flex material had the lowest elastic modulus and tensile strength value, which was statistically significant.

Conclusion: According to the results of this study, the multilayered Zendura Flex and CA Pro materials showed the lowest elastic modulus and the lowest tensile strength values to support this result. The results of this study supported that different clear aligner materials show different mechanical properties. In order to increase the success of clear aligner treatment, it has been predicted that proper aligner materials can be determined with a good knowledge of the mechanical properties of aligner materials.

Keywords: Clear aligners, mechanical properties, elastic modulus.

Giriş

Günümüzde ortodontik tedavideki erişkin hasta sayısındaki artış, geleneksel sabit apareylere göre estetik ve konforlu bir alternatif olan şeffaf plaklara talebin artmasına neden olmuştur¹⁻³. Şeffaf plak teknolojilerindeki gelişmeler, bu yöntemle daha karmaşık vakaların tedavi edilebilmesini sağlayarak daha çok sayıda vakanın tedavi edilebilmesini mümkün kılmıştır⁴.

Şeffaf plakların çok sayıdaki avantajları arasında, neredeyse ağızda hiç görülmeyen estetik bir tedavi deneyimi sağlamaları, kullanımlarının kolay ve konforlu olması, hasta tarafından takılıp çıkarılabilir olmaları, ağız hijyeninin sağlanmasını kolaylaştırmaları, periodontal açıdan daha sağlıklı olmaları, sabit ortodontik apareylere göre tedavinin ilk günlerinde daha az ağrıya neden olmaları, daha kısa sürede daha hızlı bir tedavi olanağı sağlayabilmeleri, randevu sayısını ve süresini azaltıp daha az acil ziyaret gerektirmeleri bulunmaktadır⁵⁻⁷. Ancak şeffaf plakların yüksek

üretim maliyetleri, tedavi başarısının hasta kooperasyonuna bağlı olması ve bazı maloklüzyonların tedavi edilememesi gibi dezavantajları da vardır⁸⁻¹¹.

İlk olarak 1945 yılında Kesling tarafından termoplastik şeffaf apareylerle küçük diş hareketleri yapılabileceği prensibi tanıtılmıştır¹². Bu prensip, daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilerek kullanılmıştır. Şeffaf plak teknolojisinin öncüsü olan Invisalign sistemi, ilk kez 1997 yılında bilgisayar mühendisliği öğrencileri Zia Chisti ve Kelsey Wirth tarafından teorik olarak tanımlanmıştır. Invisalign sisteminde, her randevuda ölçü alıp set-up yapmak yerine bilgisayar destekli bir tasarımla yani CAD/CAM teknolojisiyle elde edilen 3 boyutlu modeller üzerinden dişleri hareket ettiren plaklar üretilmektedir^{13,14}.

Bu sistemde; hastanın geleneksel yöntemlerle veya 3 boyutlu tarayıcılarla dijital olarak alınmış ölçülerinden elde edilen yüksek hassasiyetli kalıpları lazer tarayıcı ile taranıp 3 boyutlu dijital modeller elde edilir. Bu, hastanın dişlerinin, özel yazılım aracılığıyla, internet bağlantılı bir programda hekim tarafından değiştirilip geliştirilen bir tedavi planı olarak ekrana yansıtılan 3 boyutlu model olarak çoğaltılmasına olanak tanır. Bu tedavi planını hekim onayladıktan sonra her tedavi basamağı için stereolitografik modeller üzerinde şeffaf plak serileri üretilerek kliniğe kargo ile gönderilir^{1,8}.

Genel olarak, şeffaf plak materyalleri, ağız ortamındaki sıcaklık, nem ve çiğneme kuvvetleri değişimlerine ve tükürük enzimleriyle uzun süreli temasa maruz kalan inert olmayan reçine polimerleridir¹⁵. Günümüzde şeffaf plakların üretiminde en çok kullanılan materyaller polietilen, kopolyester, polikarbonat, termoplastik poliüretanlar ve polipropilenlerdir¹⁶.

Piyasada kullanılan plakların çoğunun materyali olan modifiye edilmiş polietilen tereftalat glkol (PET-G), yapısal olarak amorf ve şeffaftır¹⁷.

Şeffaf plaklarla ortodontik maloklüzyonları teşhise göre tedavi etmek için güvenilir iki ana protokol vardır. Bunlar; uygun bir aşamalandırmanın geliştirilmesi ve istenen kuvvet sistemlerini sağlamak için biyomekanik çalışmasıdır¹⁸. Bu nedenle, plakların üretiminde kullanılan termoplastik malzemenin mekanik performansı, plak kalınlığı ve geometri tasarımı ile birlikte, zor ortodontik hareketlerde istenilen sonuçların elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır^{19,20}. Bu termoplastik materyaller, iyi elastikiyet, şeffaflık, biyoyumluluk, düşük sertlik, esneklik ve tükürükte depolamaya karşı direnç gibi belirli özelliklere sahip olmalıdırlar²¹.

Çalışmanın amacı, şeffaf plaklar ile yapılan ortodontik tedavinin etkinliği için son derece önemli olan plak malzemelerinin mekanik özelliklerini, piyasadaki farklı firmaların 6 farklı şeffaf plak materyalleri üzerinden değişimlerinin tespiti ve etkilerinin incelenmesidir.

Gereç ve Yöntem

Bu çalışmada piyasada kullanılan farklı firmaların, 6 farklı şeffaf plak materyallerinden elde edilen plak numunelerinden, önceden belirlenen ölçülerde 3 boyutlu yazıcıda oluşturulmuş kare kalıplara basılıp, bu kare üzerinden lazer kesim ile çekme testine uygun ölçülerde köpek kemiği şeklinde numuneler elde edilmiştir. Toplam 6 grubun her birinde 5 adet numune olacak şekilde toplam numune sayısı 30 adettir. Bu malzemelerin numuneleri, çekme testi ile karakterize edilmiştir. Testlerin amacı, malzemelerin ortodontik kuvveti etkileyebilecek mekanik özelliklerinin malzeme cinsine göre değiştiğini analiz edip birbiriyle karşılaştırmaktır.

Çalışmadaki deneysel testler termoplastik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek için genel ilkeleri, koşulları ve prosedürleri belirten EN ISO 527-1:2019'a göre tasarlanmıştır²². Çekme deneyi sonucunda numunelerin elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlenmiştir. Numunelerin gerilim-uzama eğrileri rapor edilmiş ve malzemelerin mekanik davranışı analiz edilmiştir.

Şeffaf Plak Numunelerinin Oluşturulması

Üç boyutlu (3B) yazıcıda, 8 cm kenar uzunlukları ve 1,5 cm yükseklik ile 1,5 cm kalınlıkta 3 boyutlu kare şeklinde plastik kalıplar basılmıştır. Bu kare plastik kalıplara, Ministar S (Scheu Dental) plak vakum cihazında Tablo 1'de belirtilen ve Resim 1'de gösterilen birbirinden farklı 125 mm çaplı daire şeklinde 0.76 mm kalınlığında şeffaf plaklar basılmıştır. (Resim 2A ve B)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan 6 farklı şeffaf plak materyali

Plak Materyali Kodu	Üretici Firması	Materyalin İçeriği	Katman Sayısı	Plak Kalınlığı
CA Pro	Scheu Dental	Copolyester-TPE-Copolyester	Çok	0,03inch-0,76mm
GT Flex	GoodFit Technologies	Polyethylenterephthalat-Glycol Copolyester (PETG)	Tek	0,03inch-0,76mm
Zendura Flex	Bay Materials	Thermoplastic polyurethanes (TPU)	Çok	0,03inch-0,76mm
Zendura	Bay Materials	Thermoplastic polyurethanes (TPU)	Tek	0,03inch-0,76mm
Taglus	Vedia Solutions	Polyethylenterephthalat-Glycol Copolyester (PETG)	Tek	0,03inch-0,76mm
GT Pro	GoodFit Technologies	Polyethylenterephthalat-Glycol Copolyester (PETG)	Tek	0,03inch-0,76mm

Resim 1. Çalışmada kullanılan 6 farklı şeffaf plak materyali



Resim 2. A) Ministar (Scheu Dental) plak vakum cihazı B) Plakların kare kalıplara basılmış hali



Aynı kalınlıktaki bu basılmış kare şekilli plak numunelerinin her biri Ay-Ka marka 130 W CNC Galvo lazer cihazıyla (Resim 3) kesilerek, çekme testine uygun standartlarda EN ISO 527-2, numune tipi 5B^{22,23} 'ye göre tasarlanmış köpek kemiği şeklinde 5'er adet numune elde edilmiştir. (Resim 4)

Resim 3. Numunelerin kesildiği lazer cihazı



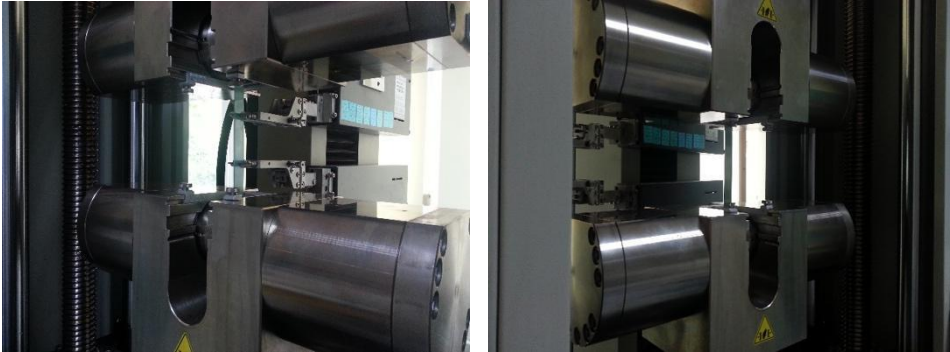
Resim 4. Kare kalıplara basılmış plaklar üzerinde lazer kesimle çekme deneyine uygun numunelerin elde edilmesi



Çekme Testi

Çalışmadaki 6 grup numuneye çekme testi Tübitak Gebze Ulusal Metroloji Enstitüsü Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarında, Zwick Z250 Üniversal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde test hızı 5 mm/dk alınmıştır. Deney, 23 C'de oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. (Resim 5)

Resim 5. Çekme deneyi makinası fotoğrafı



İstatistiksel Analiz

İstatistiksel analizler için SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 24.0 programı kullanılmıştır. Çalışma verileri değerlendirilirken tanımlayıcı istatistiksel metodların (Ortalama, Standart Sapma, Medyan, Frekans, Oran, Minimum, Maksimum) yanı sıra normal dağılım göstermeyen parametrelerin iki grup karşılaştırmalarında Mann Whitney U testi, üç ve üzeri grup karşılaştırmalarında ise Kruskal Wallis Testi kullanılmıştır. Anlamlılık $p < 0,01$ ve $p < 0,05$ düzeylerinde değerlendirilmiştir.

Bulgular

Her birinden 5 numune olacak şekilde farklı firmaların 6 farklı şeffaf plak materyallerinden oluşan toplam 30 adet numunenin çekme testinden elde edilen elastisite modülü, çekme

dayanımı ve kopma uzaması değerleri istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu değerler Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Çekme testi sonucu elde edilen değerler

Plak Materyali Kodu	Elastisite Modülü, MPa	Çekme Dayanımı, MPa	Kopma Uzaması, %
CA Pro	963	27,6	76
Zendura	1370	53,9	15
Zendura Flex	736	24,8	27
GT Pro	1182	39,4	12
GT flex	1480	46,3	72
Taglus	1363	41,6	29

Tablo 3 incelendiğinde materyal türlerine göre elastisite modülü ölçümleri istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir ($p=0,001$; $p<0,01$).

Elastisite modül sonuçları incelendiğinde, Zendura Flex materyalinin elastisite modül değeri en düşük bulunmuştur. Bu materyalin esnekliğinin daha yüksek olması anlamına gelmektedir.

Tablo 3. Materyallere göre elastisite modülü sonuçlarının karşılaştırılması

Plak Materyali Kodu	Elastisite Modülü		^b p	^a Fark
	Ortalama±SS	Min-Max (Median)		
¹ GT Pro	1182,4±74,64	1098-1299 (1168)	0,001**	1-2, 1-3, 1-4 1-5, 1-6, 2-3 2-4, 2-5, 2-6, 3-4, 3-5, 3-6
² Zendura Flex	735,8±60,88	700-844 (715)		
³ CA Pro	963,6±35,11	927-1009 (949)		
⁴ GT Flex	1479,8±110,8	1378-1639 (1421)		
⁵ Zendura	1370,4±74,35	1303-1460 (1340)		
⁶ Taglus	1363,2±90,72	1243-1495 (1360)		

^bKruskall Wallis Testi

^aMann Whitney U Testi

** $p<0,01$

Tablo 4 incelendiğinde, materyal türlerine göre çekme dayanımı ölçümleri istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir ($p=0,001$; $p<0,01$).

Çekme dayanımı değerlerine bakılırsa, Zendura materyalininki en yüksek bulunmuştur. Bu malzemenin deformasyona yol açan kuvvet değerinin daha yüksek yani malzemenin deformasyonu için daha fazla bir kuvvete ihtiyaç olacağını gösterir. Bir başka deyişle materyal daha az esnediğinden şekillendirebilmek için daha fazla kuvvet gerekmektedir.

Tablo 4. Materyallere göre çekme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması

Plak Materyali Kodu	Çekme Dayanımı		b ^p	aFark
	Ortalama±SS	Min-Max (Median)		
¹ GT Pro	39,4±1,63	36,8-41 (39,8)	0,001**	1-2, 1-3, 1-4
² Zendura Flex	24,8±1,48	23,8-27,4 (24,3)		1-5, 1-6, 2-3
³ CA Pro	27,6±0,86	26,4-28,6 (27,9)		2-4, 2-5, 2-6,
⁴ GT Flex	46,34±2,52	44,2-50,1 (45,3)		3-4, 3-5, 3-6
⁵ Zendura	51,32±2,45	49,3-55,6 (50,6)		4-5, 5-6
⁶ Taglus	41,64±3,75	37,8-47,9 (41)		

^bKruskall Wallis Testi

^aMann Whitney U Testi

**p<0,01

Tablo 5 incelendiğinde, materyal türlerine göre kopma uzaması ölçümleri istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir (p=0,001; p<0,01).

Kopma uzama değerlerindeki farklılığa bakılırsa, GT Pro materyalinin kopma uzaması ölçümü en düşük bulunmuştur. Bu malzemenin kopması için gerekli uzama değerinin daha düşük olacağını yani malzemenin daha düşük uzama değerinde kopacağını gösterir.

Tablo 5. Materyallere göre kopma uzaması sonuçlarının karşılaştırılması

	Kopma Uzaması		b ^p	aFark
	Mean±SD	Min-Max (Median)		
¹ GT Pro	12,0±4,8	39,8-12 (4,8)	0,001**	1-2, 1-3, 1-4
² Zendura Flex	27,2±12,85	24,3-27,2 (12,85)		1-5, 1-6, 2-3
³ CA Pro	75,6±62,47	27,9-75,6 (62,47)		2-4, 2-5, 3-5 3-6, 4-5, 5-6
⁴ GT Flex	71,8±53,49	45,3-71,8 (53,49)		
⁵ Zendura	13,4±5,32	50,6-13,4 (5,32)		
⁶ Taglus	29±23,79	41-29 (23,79)		

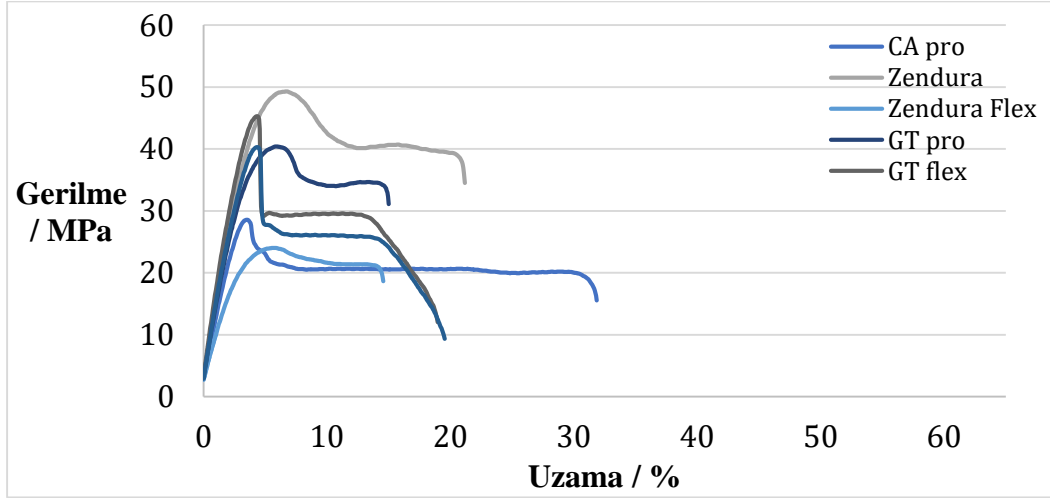
^bKruskall Wallis Testi

^aMann Whitney U Testi

**p<0,01

Gerilme-uzama grafiği, test edilen 6 malzemenin mekanik davranışını göstermek için Şekil 1'de gösterilmiştir. Gerilme-uzama eğrilerini analiz edersek, Zendura'nın kuvvete karşı esnemesinin daha düşük olduğu belirgindir ve eğri tek bir testi temsil etmesine ve elastisite modülü ortalama bir değer olmamasına rağmen, bu gözlem aynı zamanda Tablo 2'deki daha yüksek ortalama değeriyle de uyumludur.

Şekil 1. Çekme deneyi gerilme uzama grafiđi



Tartışma

Şeffaf plak tedavisi ile zor ortodontik hareketlerde istenilen sonuçların elde edilebilmesinde, termoplastik plak materyalinin mekanik özellikleri kritik bir rol oynamaktadır¹⁹. Şeffaf plakların özellikle aşırı çapraşık dişlerde kolayca esneyip bu dişleri kolayca kavrayabilmesi için uygun esnekliğe ve şekil hafızasına sahip olması gerekmektedir. Eğer plak esneyemezse dişleri hareket ettirmesi zorlaşacaktır. Şeffaf plak tedavisinde hareket ettirilmek istenilen dişe, esnek yapıdaki termoplastiğin eski haline dönmeye çalışırken uyguladığı kuvvetler etki etmektedir. Bu nedenle bu plakların esneklik özellikleri yeterli diş hareketi sağlamak için çok önemlidir²⁴.

Şeffaf plakların dişleri hareket ettirebilmek için uyguladıkları kuvvet, dişin şekline, plak materyalinin mekanik özelliklerine, plağın dişlerin üzerine uygun olarak oturmasına ve plağın önceden sanal ortamda programlanmış aktivasyonuna bağlıdır²⁵.

Inoue ve ark.'nın şeffaf plakların fiziksel özelliklerinin ortodontik kuvvete olan etkisini sonlu elemanlar analizi ile 4 farklı plak materyali üzerinde inceledikleri 2020 yılındaki çalışması, elastisite modülünün ortodontik kuvvetin değerlendirilmesi için uygun olduğunu göstermiştir²⁶.

Kohda ve ark.'nın 2013 yılında yaptığı şeffaf plakların mekanik özelliklerinin ortodontik kuvvet üzerindeki etkisini inceleyen çalışmada¹⁹, termoplastik plak materyallerinin mekanik özellikleri ile plakların ürettiği kuvvet arasında güçlü bir korelasyon bulunmuş ve polimerlerin nanoindentasyon testi ile elde edilen mekanik özellikleri, bu apareyler tarafından üretilen kuvvet iletiminin öngörücüsüdür sonucuna varılmıştır¹⁹.

Bu çalışmada da farklı şeffaf plak materyallerinin farklı mekanik özelliklerinin klinikteki etkisinin yorumlanabilmesi için plakların uyguladıkları ortodontik kuvveti değerlendirebilmek amacıyla çekme deneyi sonuçlarından elastisite modülü incelenmiştir. Diğer yapılan benzer çalışmalardan da bilindiği üzere, elastisite modülü ve esneklik arasında ters bir orantı vardır²⁷⁻²⁹. Plak malzemesinin yüksek esneklik göstermesi avantaj olmaktadır. Bunun yanısıra malzemenin esneklik özelliğiyle açıklanabilen çekme dayanımı ve kopma uzaması sonuçları da incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan tüm plak numunelerinin, 0,76 mm olacak şekilde aynı kalınlıkta seçilmesi, kalınlıktan bağımsız olarak mekanik özelliklerinin değerlendirilmesini sağlamıştır.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre elastisite modül değeri en düşük bulunan Zendura Flex, çalışmada seçilen 6 farklı materyal arasındaki en esnek materyaldir. Bu çalışmaya benzer şekilde 2020 yılında tez amaçlı Nebraska Üniversitesi'nde yapılan bir invitro çalışmada da Zendura Flex plak materyali, diğer materyallere (Zendura ve Taglus) göre en düşük elastisite modül değeri göstermiştir³⁰.

Çekme deneyinden elde edilen diğer değerlerden biri olan çekme dayanımı değerlerinin sonuçlarına bakıldığında da Zendura Flex materyalininki en düşük bulunmuştur. Bunun sebebi olarak, materyal fazla esnediğinden şekillendirebilmek için gerekli kuvvet daha düşük olarak belirlenmiştir. Yani esneklik arttığında şekillendirme kuvveti düşmektedir.

Numunelere plak katman sayısına göre bakıldığında, çok katmanlı yapıya sahip olan Zendura Flex ve CA Pro materyali, tek katmanlı diğer plak numunelerine göre daha düşük elastisite modülü yani daha fazla esneklik özelliği göstermektedir. Bu durumu destekleyecek şekilde çekme dayanımı değerleri de daha düşüktür. Tek katmanlı plak numunelerine kendi içinde bakıldığında, en esnek özellikte olanı, elastisite modülü en düşük olan GT Pro materyalidir. Kuvvet karşısında en fazla esneyebilen GT Pro materyali daha düşük kuvvetlerle şekillenebileceğinden çekme dayanımı değeri de daha düşük bulunmuştur.

Kopma uzaması değerlerindeki sonuçlara bakılırsa, CA Pro materyali en yüksek değere sahiptir. Bu materyalin daha yüksek uzama değerlerinde kopacağını gösterir. Bu durum, elastisite modülü Zendura Flex materyalinden sonra en düşük olan CA Pro materyalinin yüksek esneklik göstermesi ile desteklenmektedir. Bunun yanı sıra, en yüksek esnekliğe sahip Zendura Flex materyali beklenmeyecek şekilde düşük bir kopma uzaması değeri göstermiştir. Oldukça esnek bir materyal

olan Zendura Flex'in, uzama karşısındaki bu kolay kopmasını, çok katmanlı yapısındaki katmanlarının uzama karşısındaki davranışına da bağlı olabileceği düşünülebilir. Katman yapısı kopma uzamasına etken bir parametredir. Tek katmanlı yapıya sahip GT Pro materyali, yine tek katmanlı plak numunesi GT Flex materyaline göre daha esnek olmasına rağmen daha düşük kopma uzaması değeri göstermektedir. Bu da her iki materyalin imal edildiği malzemenin özelliklerinden kaynakladığı belirtilebilir.

Sonuç

Bu çalışmanın sonuçlarına göre çok katmanlı yapıda olan Zendura Flex ve CA Pro materyalleri, en düşük elastisite modül değeri göstermiştir. Bu sonucu destekleyecek şekilde her iki materyalin çekme dayanımını da en düşük değerler göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları sıfır hipotezini desteklemiştir. Çalışmanın sonuçları, termoplastik malzemelerden imal edilmiş farklı şeffaf plak materyallerinin farklı mekanik özellikler gösterdiğini desteklemiştir. Bu nedenle materyaller, mekanik özelliklerinin ayrıntılı karakterizasyonundan sonra ortodontik şeffaf plaklarda kullanım için seçilmelidir. Şeffaf plak tedavisinin başarısını arttırmak amacıyla plak materyalleri mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi ile uygun plak materyallerinin belirlenebileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Weir T. Clear Aligners in Orthodontic Treatment. *Aust Dent J.* 2017;3(1):58-62. doi:10.1111/adj.12480.
2. Karkhanechi M, Chow D, Sipkin J, et al. Periodontal status of adult patients treated with fixed buccal appliances and removable aligners over one year of active orthodontic therapy. *Angle Orthod.* 2013;83(1):146-51. doi:10.2319/031212-217.1.
3. Malik OH, McMullin A, Waring DT. Invisible orthodontics part 1: Invisalign. *Dent Update.* 2013;40(3):203-4. doi:10.12968/denu.2013.40.3.203.
4. Graber TM. Clear Aligner Treatment. In: Paquette D, Colville C, Wheeler T, eds. *Orthodontics: Current Principles and Techniques.* St. Louis, Mosby; 2012:778-811.
5. Fujiyama K, Honjo T, Suzuki M, Matsuoka S, Deguchi T. Analysis of pain level in cases treated with Invisalign aligner: Comparison with fixed edgewise appliance therapy. *Prog Orthod.* 2014;15(1):64. doi:10.1186/s40510-014-0064-7.
6. Miller KB, McGorray SP, Womack R, et al. A comparison of treatment impacts between invisalign aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;131(3):302.e1-9. doi:10.1016/j.ajodo.2006.05.031.
7. Ali SA, Miethke HR. Invisalign, an innovative invisible orthodontic appliance to correct malocclusions: Advantages and limitations. *Dent Update.* 2012;39(4):254-6,258-60. doi:10.12968/denu.2012.39.4.254.

8. Joffe L. Invisalign: Early experiences. *J Orthod.* 2003;30(4):348-52. doi:10.1093/ortho/30.4.348
9. Drake C, McGorray S, Dolce C, Nair M, Wheeler T. Orthodontic tooth movement with clear aligners. *ISRN Dent.* 2012;2012:657973. doi:10.5402/2012/657973.
10. Phan X, Ling PH. Clinical limitations of invisalign. *Journal of the Canadian Dental Association.* 2007;73(3):263-6.
11. Benson H Wong. Invisalign a to z. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 2002;121(5):540-1. doi:10.1067/mod.2002.123036.
12. Grossman W, Moss JP. Removable appliance therapy. *JPO J Pract Orthod.* 1968;2(1):28-36.
13. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod.* 1945;31:297-304. doi:10.1016/0096-6347(45)90101-3
14. Papadimitriou A, Mousoulea S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of invisalign orthodontic treatment: A systematic review. *Prog Orthod.* 2018;19(1):37. doi:10.1186/s40510-018-0235-z.
15. Eliades T, Eliades G, Watts DC. Structural conformation of in vitro and in vivo aged orthodontic elastomeric modules. *Eur J Orthod.* 1999;21(6):649-58. doi: 10.1093/ejo/21.6.649.
16. Johal A, Bondemark L. Clear aligner orthodontic treatment: Angle society of europe consensus viewpoint. *J Orthod.* 2021;48(3):300-304. doi:10.1177/14653125211006423.
17. Lu H, Tang H, Zhou T, Kang N. Assessment of the periodontal health status in patients undergoing orthodontic treatment with fixed appliances and invisalign system: A meta-analysis. *Medicine (Baltimore).* 2018;97(13):e0248. doi:10.1097/MD.0000000000010248.
18. Cervinara F, Cianci C, De Cillis F, et al. Experimental study of the pressures and points of application of the forces exerted between aligner and tooth. *Nanomaterials.* 2019;9:1010-8. doi:10.3390/nano9071010.
19. 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(3):476-83. doi:10.2319/052512-432.1.
20. Savignano R, Vecilli RF, Paoli A, Razionale A, Barone S. Nonlinear dependency of tooth movement on force system directions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2016;149(6):838-46. doi:10.1016/j.ajodo.2015.11.025.
21. Alexandropoulos A, Al Jabbari YS, Zinelis S, Eliades T. Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials. *Aust Orthod J.* 2015;31(2):165-70. doi:10.21307/aoj-2020-151.

22. Standardization IOf. ISO 527-1:2012 Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 1: General principles. ISO. <https://www.iso.org/standard/56045.html>. Yayınlanma tarihi Şubat 2012. Güncellenme tarihi Temmuz 2019.
23. 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(1):43-8. doi:10.3290/j.cjdr.a35696.
24. Kwon JS, Lee YK, Lim BS, Lim YK. Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;133(2):228-34. doi:10.1016/j.ajodo.2006.03.034.
25. Beers A, Duong T. In: Tuncay OC, ed. *Mechanics of Tooth Movement with Invisalign.* New Malden, United Kingdom: Quintessence Publishing Company; 2006:149-151 Chapter 17.
26. Sayuri I, Satoshi Y, Hiroshi U, Takashi Y, Satoshi I. Influence of constant strain on the elasticity of thermoplastic orthodontic materials. *Dental Materials Journal.* 2020;39(3):415-421. doi:10.4012/dmj.2019-104.
27. 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. doi:10.1016/j.odw.2006.03.003.
28. 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(2):47-56. doi:10.3390/dj8020047.
29. Nguyen AT. Quantitative Evaluation Criteria for the Mechanical Properties of Orthodontic Clear Aligners [master's thesis]. Los Angeles, ABD: Science in Oral Biology, University of California; 2020.
30. Keller, KJ. Stress Relaxation in Orthodontic Aligner Plastics; An In Vitro Comparison Study [thesis]. Omaha, ABD: Medical Sciences Interdepartmental Area, University of Nebraska Medical Center; 2020.