

ÖZGÜN ARAŞTIRMA

Üç farklı nikel-titanyum sistemin çoklu kullanımları sonrası döngüsel yorgunluk dirençlerinin karşılaştırılması

Cyclic fatigue resistance of three different nickel-titanium systems after simulated clinical use

Dt. Hilal Uslu

İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü,
İstanbul

ORCID ID: 0000-0001-6738-0018

Prof. Dr. Faruk Haznedaroğlu

İstanbul Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi,
Endodonti A.D., İstanbul

ORCID ID: 0000-0003-1658-2976

Geliş tarihi: 22.01.2023

Kabul tarihi: 25.02.2023

doi: 10.5505/yeditepe.2024.09326

Yazışma adresi:

Dt. Hilal Uslu

Selami Ali Mah. Kuşakçı Sok. No 38/5
Üsküdar İstanbul

Tel: 0 537 245 66 93

E-posta: hilal_gamli@hotmail.com

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, üç farklı nikel-titanyum sistemin akrilik bloklarda çoklu kullanımları sonrası döngüsel yorgunluk dirençlerini karşılaştırmaktır.

Gereç ve Yöntem: Çalışmada üç farklı nikel-titanyum sistemi döngüsel yorgunluk direnci yönünden karşılaştırılmıştır [Revo-S (Micro-Mega, Besancon, France) 25/06, ProTaper Gold (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK) 25/08 ve Hyflex CM (Coltene/Whaledent, Altstätten, İsviçre) 25/06]. Her birinden 12'şer adet örneğin kullanıldığı üç grup oluşturulmuştur. Bu örnekler ile öncelikle 60° kanal eğimine ve 18 mm kanal uzunluğuna sahip akrilik bloklarda üçer kez kök kanal şekillendirilmesi yapılmıştır. Tüm sistemler üretici firmaların önerdiği hız ve tork değerlerinde kullanılmıştır. Daha sonra da bu aletler döngüsel yorgunluk testine tabi tutulmuştur. Aletler eğim açısı 60°, eğim yarıçapı 5 mm ve uzunluğu 18 mm olan paslanmaz çelik yapay kanallarda kırık oluşana kadar çalıştırılmıştır. Her bir örnek için kırılma anındaki değerler kaydedilerek değerlendirilmiştir.

Bulgular: Çalışmada değerlendirilen üç sistemin arasında kırılma zamanı değerleri yönünden istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu görülmüştür ($p<0,05$). Buna göre en yüksek değeri kırılma direncini Hyflex CM sergilerken, bunu ProTaper Gold takip etmiş, en yetersiz sonuçlar ise Revo-S grubunda elde edilmiştir. Sistemler arasında kırık parça uzunluğu yönünden ise istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$).

Sonuç: Çoklu kullanım sonrası döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilen sistemlerden, ısı işlem uygulamasına tabi tutulmuş Hyflex CM ve ProTaper Gold sistemleri, geleneksel nikel-titanyum alaşımından üretilmiş Revo-S sisteminden daha yüksek kırılma direnci göstermişlerdir.

Anahtar Kelimeler: Nikel-titanyum, Döngüsel yorgunluk, Isıl işlem.

SUMMARY

Aim: The aim of this study is to compare the cyclic fatigue resistance of three different nickel-titanium systems after multiple uses in acrylic blocks.

Materials and Method: In the study, three different nickel-titanium systems were compared in terms of cyclic fatigue resistance [Revo-S (Micro-Mega, Besancon, France) 25/06, ProTaper Gold (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK) 25/08, and Hyflex CM (Coltene/Whaledent, Altstätten, Swiss) 25/06]. Three groups were formed in which 12 samples each were used. Acrylic blocks with an angle of curvature of 60° and a canal length of 18 mm were instrumented three times. All systems were used at the speed and torque values recom-

mended by the manufacturers. Afterwards, these instruments were subjected to a cyclic fatigue test. The instruments were operated until fracture occurred in stainless steel artificial channels with an angle of curvature of 60°, a radius of curvature of 5 mm, and a length of 18 mm. For each sample, the values at the time to fracture were recorded and evaluated.

Results: It was observed that there was a statistically significant difference between the three systems evaluated in the study in terms of time to fracture values ($p < 0.05$). Thus, Hyflex CM exhibited the highest fracture resistance, followed by ProTaper Gold, and the lowest results were obtained in the Revo-S group. There was no statistically significant difference between the systems in terms of fractured fragment length ($p > 0.05$).

Conclusion: Among the systems evaluated in the cyclic fatigue test after multiple uses, the heat-treated Hyflex CM and ProTaper Gold systems exhibited higher time-to-fracture values than the Revo-S system produced from a conventional nickel-titanium alloy.

Keywords: Nickel-titanium, Cyclic fatigue, Heat treated.

GİRİŞ

Nikel-titanyum (NiTi) aletler 1988 yılında Walia ve ark. tarafından endodontide kullanıma sunulmuştur ve o tarihten günümüze NiTi aletlerde pek çok gelişme meydana gelmiştir.¹⁻³ Ancak bu gelişmelere rağmen klinik kullanımlarında nikel-titanyum aletlerde meydana gelen kırılmalar önemli ve korkulan bir komplikasyon olarak varlığını sürdürmektedir. Özellikle tasarım, NiTi alaşımı ve kinematik özelliklerinde çeşitli modifikasyonlar geliştirilerek NiTi aletlerin kök kanallarını şekillendirme etkinlikleri ve kırılmaya karşı dirençleri arttırılmaya çalışılmıştır.^{3,4} NiTi aletlerde kırık oluşumu, döngüsel yorgunluğa veya torsiyonel kuvvete bağlı meydana gelebildiği gibi her iki mekanizmanın kombinasyonu sonucunda da meydana gelebilmektedir.^{2,5,6}

Geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş aletler genel olarak östenit fazdan oluşmaktadır ve tornalama işlemiyle üretilmelerine bağlı olarak kesme etkinliklerini ve kırılma dirençlerini olumsuz etkilediği düşünülen yüzey kusurları sergileyebilmektedirler.^{4,7-9} NiTi alaşımı, östenit fazda daha sert ve dayanıklı bir yapıya sahipken; martensit fazda daha esnek ve kolay deforme olabilen bir yapıdadır.^{10,11} Revo-S (Micro-Mega, Besancon, France) geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş asimetrik kesit tasarımına sahip bir sistemdir.^{12,13}

NiTi aletlerin yorulmaya karşı dirençlerini ve esnekliklerini arttırabilmek amacıyla çeşitli üretim teknolojileri ve termomekanik NiTi işlemleri geliştirilmiştir.¹⁴⁻¹⁶ Bu termomeka-

nik üretim işlemlerine, Gold Wire, Blue Wire ve CM Wire alaşımlarından üretilmiş sistemler örnek olarak gösterilebilir.^{3,11,17-19} ProTaper Gold (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK), ProTaper Universal sistemi ile aynı tasarıma sahip, dışbükey üçgen kesitli ve değişken koniklik açısına sahip yeni bir ısıl işlem teknolojisi ile üretilmiş NiTi sistemdir.^{18,19} Hyflex CM (Coltene/Whaledent, Altstätten, İsviçre) hafıza kontrollü NiTi telinden ısıl işlem uygulaması ile üretilmiş bir sistemdir.^{11,17}

Üretici firmalar NiTi aletlerin klinikte bir defa kullanılmasını önermektedir. Bu aletler cerrahi olmayan endodontik tedavide kullanılan en pahalı tedavi malzemeleridir. Klinisyenler özellikle ekonomik kaygılar olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı NiTi aletleri çoklu sayıda kullanmaktadır.^{15,20,21} Literatürde kullanım sayısı artışına bağlı olarak NiTi aletlerin yüzeylerinde deformasyon ve mikro çatlak oluşumunun arttığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır.²²⁻²⁴ Armagan ve Haznedaroglu²⁴ ile Shen ve ark.¹⁰ yaptıkları çalışmalarda yüzey deformasyonu, mikro çatlak ve kırık oluşum riskinin özellikle 3. kullanım sonrası arttığını bildirmişlerdir.

Literatürde farklı teknolojilerle üretilmiş NiTi aletlerin çoklu kullanım sonrası döngüsel yorulma dirençlerinin karşılaştırıldığı az sayıda çalışma bulunmaktadır. Çalışmamızda farklı NiTi alaşımlarından üretilmiş 3 farklı sistemin eğimli akrilik bloklarda çoklu kullanımları sonrası (3 kullanım) döngüsel yorgunluk dirençlerinin karşılaştırması amaçlanmaktadır. Sıfır hipotezi 3. kullanım sonrasında sistemlerin döngüsel yorgunluk dirençleri arasında bir fark olmayacağı şeklindedir.

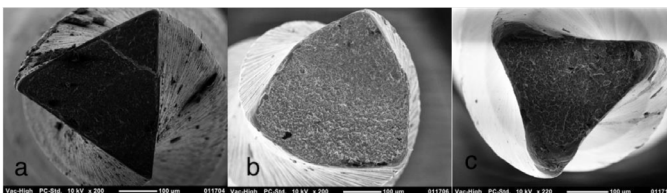
GEREÇ ve YÖNTEM

Çalışmamızda 3 farklı NiTi sisteme ait aletler değerlendirilmiş ve her bir sistemden 12 adet olmak üzere toplamda 36 adet alet kullanılmıştır. Çalışmada değerlendirilmek üzere tercih edilmiş aletler, Revo-S (Micro-Mega, Besancon, France) sisteminin 25/06, ProTaper Gold (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK) sisteminin 25/08 ve Hyflex CM (Coltene/Whaledent, Altstätten, İsviçre) sisteminin 25/06 ebatlarına ve 25 mm uzunluğa sahip eğelerinden oluşmaktadır. Her bir alet testlerde kullanılmadan önce bir stereomikroskop (SZX7; Olympus, Tokyo, Japan) yardımıyla üretim kaynaklı kusur varlığı yönünden incelenmiş ve herhangi bir alet çalışma dışı bırakılmamıştır. Tüm aletlerin döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilmeden önce çoklu kullanımlarını sağlayabilmek amacıyla akrilik bloklarda şekillendirme yapılması planlanmıştır. Çoklu kullanım için 3 kullanım tercih edilmiştir. Bu amaçla Schneider yöntemine göre 60° kanal eğimine ve 18 mm kanal uzunluğuna sahip akrilik bloklar tercih edilmiş ve her bir alet için 3 ayrı akrilik blok olmak üzere toplamda 96 adet akrilik blok kullanılmıştır. Çalışma uzunluğu, 10 K file (Dentsply Sirona) ile bloğun apikal bölgesinden çıktığı

yerden 1 mm geride kalacak şekilde tespit edilmiştir. Her bir alet akrilik bloklarda ve döngüsel yorgunluk testinde tork kontrollü bir endodontik motor (X-Smart, Dentsply Sirona) kullanılarak üretici firmaların önerdiği hız ve tork değerlerinde çalıştırılmıştır. Revo-S 300 rpm ve 0.8 N/cm tork, ProTaper Gold 300 rpm ve 3.1 N/cm tork ve Hyflex CM ise 500 rpm ve 2.5 N/cm tork değerlerinde çalıştırılmıştır. Crown-down tekniği ile 3 aşamada apikal bölgeye ulaşarak akrilik blokların şekillendirilmesi yapılmıştır. Her aşama arasında yapay kök kanalları 2 cl %5,25 NaOCl ile yıkanmıştır. Her bir alet yapay kanallardaki şekillendirme işlemi sonrasında ultrasonik cihazda temizlenmiş ve ardından 121 ° C'de 30 psi basınçta 20 dakika sterilize edilmiştir. Döngüsel yorgunluk testleri 60° eğim açısına, 5 mm eğim yarıçapına ve 18 mm uzunluğa sahip yapay kanalın bulunduğu paslanmaz çelik blokta gerçekleştirilmiştir. Blok bir sualtı ısıtıcı (AquaTop, CA) aracılığıyla 37 °C'ye ısıtılmış steril distile su ile doldurulmuş bir kap içerisine monte edilmiştir (Şekil 1). Solüsyonun ve test bloğunun sıcaklığı termokuplarla ölçülmüş ve termostat ile kontrol edilmiştir. Her bir alet görsel ve işitsel olarak kırık tespit edilinceye kadar çalıştırılmıştır. Aletlerde kırık oluşuncaya kadar geçen süre 1/100 saniyelik bir dijital kronometre kullanılarak; kırık parça uzunlukları ise bir dijital kumpas (AEK-Tech) yardımıyla ölçülmüştür. Her sistemden rastgele seçilen iki alet kırılma tipini belirleyebilmek amacıyla bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JCM-600 BENCHTOP SEM, JEOL, Tokyo, Japonya) kullanılarak incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Döngüsel yorgunluk test düzeneği



Şekil 2. Döngüsel yorgunluk testi sonrasında aletlerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüsü: (a) Hyflex CM (b) ProTaper Gold (c) Revo-S

BULGULAR

Çalışmamızda elde edilen verilerin istatistiksel analizleri SPSS versiyon 25.0 programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Değişkenlerin normal dağılıma uygunluğu histogram grafikleri ve Kolmogorov-Smirnov testi ile incelenmiştir. Tanımlayıcı analizler sunulurken ortalama, standart sapma, ortanca, min-max değerleri kullanılmıştır. Normal dağılım göstermeyen (nonparametrik) değişkenler iki grup arasında değerlendirilirken Mann Whitney U Testi, ikiden fazla grup arasında değerlendirilirken Kruskal Wallis Testi kullanılmıştır. P değerinin 0,05'in altında olduğu durumlar istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar şeklinde değerlendirilmiştir.

Yapılan döngüsel yorgunluk testi sonucunda, en yüksek kırılma zamanı değerlerini Hyflex CM sistemi sergilerken, onu sırasıyla ProTaper Gold ve Revo-S sistemleri takip etmiştir (Tablo 1). HyFlex CM sistemi diğer iki sistemden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek kırılma zamanı değerleri sergilemiştir (p<0,05). ProTaper Gold sistemi ise Revo-S sisteminden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek kırılma zamanı değerleri sergilemiştir (p<0,05).

Tablo 1: Döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilen NiTi sistemlerin kırılma zamanı ortalamaları, standart sapma ve p değerleri

	Kırılma Zamanı (sn)		p
	Ort±s.s.	Medyan (Min-Max)	
Hyflex CM	402,11±82,35	386,5 (258,11-517,47) ^a	<0,001*
ProTaper Gold	294,42±48,30	269,11 (248,42-375) ^b	
Revo-S	41,52±8,68	41,14 (26,59-53) ^c	

*Kruskal Wallis Testi

Üst karakter olarak farklı harflerle belirtilen değerler Mann Whitney U Testi'ne göre istatistiksel olarak anlamlı fark ifade etmektedir (p<0,001).

Döngüsel yorgunluk testi sonrasında sistemlerin kırık parça uzunlukları ölçülerek karşılaştırılmış ve aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür (p>0,05). En yüksek kırık parça uzunluğu değerlerini Hyflex CM sistemi sergilerken, onu sırasıyla ProTaper Gold ve Revo-S sistemleri takip etmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilen NiTi sistemlerin kırık parça uzunluğu ortalamaları, standart sapma ve p değerleri

	Kırık Parça Uzunluğu (mm)		p
	Ort±s.s.	Medyan (Min-Max)	
Hyflex CM	5,27±,31	5,25 (4,8-5,8) ^a	0,452*
ProTaper Gold	5,18±,36	5,15 (4,7-5,9) ^a	
Revo-S	5,09±,37	4,9 (4,7-5,6) ^a	

*Kruskal Wallis Testi

Üst karakter olarak aynı harflerle belirtilen değerler Mann Whitney U Testi'ne göre istatistiksel olarak anlamlı fark olmadığını ifade etmektedir (p<0,001).

TARTIŞMA

Farklı üretim teknolojilerine ve tasarımlara sahip birçok üstün özellikli NiTi alet klinisyenlerin kullanımına sunulmuş olmasına rağmen alet kırığı yine de en önemli ve korkulan komplikasyonların başında gelmektedir.^{3,25,26} Üretici firmaların bu sorunu çözebilmek amacıyla üzerinde durduğu önemli parametrelerden biri NiTi alaşımının metalürjik özellikleridir. Çalışmamızda NiTi alaşımının metalürjik farklılıklarının aletlerin döngüsel yorgunluk direnci üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla, farklı NiTi alaşımlarından üretilmiş 3 farklı sistem ter-

cih edilmiştir. Bu sistemler geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş Revo-S, termomekanik yüzey işleme uygulanmış ProTaper Gold ve hafıza kontrollü (Control Memory) NiTi alaşımından elde edilmiş HyFlex CM sistemleridir.

NiTi aletlerde kırık, torsiyonel stres veya döngüsel yorgunluğa bağlı olarak meydana gelmektedir. Döngüsel yorgunluk, eğin kök kanalı eğiminin en yüksek olduğu alanda, tekrarlayan sıkışma-gerilme döngüsüne maruz kalması sonucunda oluşmaktadır.^{5,27} Uzun yıllardır NiTi aletlerin döngüsel yorgunluk dirençlerinin değerlendirildiği birçok çalışma yapılmasına rağmen, henüz döngüsel yorgunluk testleri için standart hale gelmiş bir protokol bulunmamaktadır.²⁸ Döngüsel yorgunluk direncinin değerlendirildiği çalışmalarda, NiTi aletler farklı derece eğimlere sahip yapay kök kanalı modellerinde incelenmektedir.²⁹⁻³¹ NiTi aletlerin döngüsel yorgunluk testleri, statik ve dinamik test düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.³²⁻³⁴ Statik test düzeneklerinde alet belirli bir çalışma uzunluğunda sabit kalacak şekilde yapay kök kanalında konumlandırılırken; dinamik test düzeneklerinde alet kırılma oluşuncaya kadar, ileri geri hareket ile aksiyel düzlemde çalıştırılır.^{35,36} Dinamik test düzeneklerinde aletleri stabil bir şekilde aynı yörüngede tutabilmenin zorluğuna bağlı olarak hata olasılığının daha fazla olduğu düşünülmektedir.^{29,31,37} Çalışmamızda tekrarlanabilir bir döngüsel yorgunluk testi gerçekleştirebilmek ve aletler arasında standardizasyonu sağlayabilmek amacıyla statik test düzeneği kullanımı tercih edilmiştir.

Döngüsel yorgunluk testlerinin yapıldığı çalışmalar incelendiğinde, farklı tasarımlara sahip yapay kanal modellerinin bulunduğu akrilik, cam ve metal bloklardan oluşan test düzeneklerinin kullanıldığı görülmektedir.^{29,30,38,39} Bu çalışmaların büyük çoğunluğunda aletlerin döngüsel yorgunluklarının değerlendirilmesinde paslanmaz çelik blokların bulunduğu test düzeneklerinin kullanıldığı görülmektedir.³⁹⁻⁴² Çalışmamızda literatürdeki bu çalışmalar ile uyumlu olacak şekilde bir paslanmaz çelik blok kullanımı tercih edilmiştir.

Endodontide uzun yıllardır NiTi aletler ile ilgili önemli tartışma konularından biri aletlerin kullanım sayısı olmuştur. Üretici firmalar güvenli kullanım için aletlerin yalnızca bir defa kullanılmalarını tavsiye etmektedir.^{20,43} Ancak hekimler tarafından klinik pratiğinde bu aletler genellikle çoklu sayıda kullanılmaktadır.^{15,20,21,24} Literatür incelendiğinde, çoklu sayıda kullanılmış NiTi aletlerin döngüsel yorgunluklarının değerlendirildiği çalışmalarda döngüsel yorgunluk testi öncesi aletlerin klinikte tedavi edilen dişlerde veya laboratuvarında çekilmiş insan dişlerinde ve akrilik bloklarda kullanıldığı görülmektedir.^{15,38,44-46} Klinik koşulların taklit edilebildiği bir çalışma gerçekleştirebilmek için aletler doğal dişlerde kullanılmalıdır. Ancak hasta ağzında ya da çekilmiş olarak kullanılabilen doğal dişler yalnızca bir defa kullanılabilir.

tedir. Doğal diş anatomileri arasındaki farklılıklar ve her bir dişin bir defa kullanılabilir olması göz önüne alındığında, standart ve tekrar edilebilir bir deney gerçekleştirmek olanaksız hale gelmektedir.³⁰ Bu nedenle çalışmamızda deney koşullarını standardize edebilmek amacıyla NiTi aletlerin çoklu kullanımları için akrilik bloklar tercih edilmiştir.

NiTi aletlerin döngüsel yorgunluk dirençlerinin değerlendirildiği çalışmalarda önemli faktörlerden birisi de deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığıdır. NiTi alaşımı sıcaklık ve strese bağlı olarak değişim gösterebilen 3 farklı yapısal fazda bulunabilmektedir. Literatürde birçok çalışmacı, ortam sıcaklığının NiTi aletlerin döngüsel yorgunluk direncini etkilediğini bildirmiştir.^{31,42,47-49} Çalışmamızda klinik koşulları daha iyi yansıtabilmek amacıyla döngüsel yorgunluk testinde ortam sıcaklığı olarak vücut sıcaklığı (37 °C) tercih edilmiştir.

Çalışmamızda yapılan döngüsel yorgunluk testinde en yüksek değeri HyFlex CM grubu sergilerken onu sırasıyla ProTaper Gold ve Revo-S grupları takip etmiştir. Tüm grupların döngüsel yorgunluk dirençleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık gözlenmiştir. CM wire ile üretilen NiTi aletlerde üretim sürecinde ısıl işlem uygulaması ile alaşımın şekil hafızası özelliği üzerinde kontrol sağlanarak aletlere ön büküm verilebilme özelliği kazandırılır. Alete kazandırılan bu özellik ile daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci elde edildiği bildirilmiştir.³ CM wire aletlerin, geleneksel NiTi aletler ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci sergiledikleri literatürde birçok çalışmacı tarafından bildirilmiştir.⁵⁰⁻⁵³ Çalışmamızın sonuçları da literatürdeki bu çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Çalışmamızda kullanılan CM wire ile üretilmiş HyFlex CM sistemi geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş Revo-S sisteminden anlamlı derecede daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci değerleri sergilemiştir.

ProTaper Gold, ProTaper Universal sistemi ile aynı tasarıma sahip yeni bir ısıl işlem uygulaması ile üretilen bir sistemdir. Bu ısıl işlem uygulaması ile aletin esnekliğinde ve yorulma direncinde artış elde edilmiştir.^{19,54} Pereira ve ark.¹⁸, Khalil ve Natto¹⁹ ile Barut ve ark.⁵⁴ tarafından yapılan çalışmalarda, ProTaper Gold sistemi geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş sistemler ile döngüsel yorgunluk direnci açısından karşılaştırılmış ve ProTaper Gold sisteminin daha yüksek yorulma direnci sergilediği bildirilmiştir. Çalışmamızın sonuçları bu çalışmalar ile tutarlılık sergilemektedir. Çalışmamızın döngüsel yorgunluk testi sonuçlarında ProTaper Gold sisteminin geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş Revo-S sisteminden anlamlı ölçüde daha yüksek değerler sergilediği görülmektedir.

Çalışmamızın sonuçlarında Hyflex CM grubu ProTaper Gold grubundan istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci değerleri ser-

gilemiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde aletlerin koniklik açısı artışına bağlı olarak döngüsel yorgunluk dirençlerinde azalma eğilimi gözlemlendiği bildirilmiştir.^{55,56} Çalışmamızda kullanılan Hyflex CM aleti #25 uç çapına 0,06 koniklik açısına sahipken; ProTaper Gold aleti #25 uç çapına 0,08' lik değişken koniklik açısına sahiptir. Koniklik açıları arasındaki bu farkın, sistemlerin döngüsel yorgunluk direnci arasındaki farkı etkilemiş olabileceğini düşünmekteyiz. Manojkumar ve ark.⁵⁷ tarafından yapılan ve 3 farklı NiTi sistemin döngüsel yorgunluk direncinin karşılaştırıldığı çalışmada 60° eğime sahip yapay kanal modelinde, Hyflex CM sistemi ProTaper Gold sisteminden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci sergilemiştir. Bu çalışmanın sonuçları bizim çalışmamızın sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

Döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilen sistemlerin kırık parça uzunlukları karşılaştırılmış ve gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Çalışmalarda, döngüsel yorgunluk testinde değerlendirilen aletlerin benzer kırık parça uzunlukları sergilemeleri, aletlerin test düzeneğinde doğru konumlandırılmalarıyla ilişkilendirilmektedir.^{37,58}

SONUÇ

Sistemlerin çoklu kullanımları sonrasında yapılan döngüsel yorgunluk testinde, ısıl işlem uygulaması ile üretilmiş Hyflex CM ve ProTaper Gold sistemleri, geleneksel NiTi alaşımından üretilmiş Revo-S sisteminden daha yüksek döngüsel yorgunluk direnci sergilemişlerdir.

KAYNAKLAR

1. Walia H, Brantley WA, Gerstein H. An Initial Investigation of the Bending and Torsional Properties of Nitinol Root Canal Files. *J Endod* 1988; 14(7): 346-51.
2. Zhou H, Zheng YF. An overview of the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *Endod Topics* 2013; 29: 42-54.
3. Gavini G, Santos MD, Caldeira CL, Machado MEL, Freire LG, et al. Nickel-titanium instruments in endodontics: A concise review of the state of the art. *Braz Oral Res* 2018; 32: 44-65.
4. Thompson SA. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J* 2000; 33(4): 297-310.
5. McGuigan MB, Louca C, Duncan HF. Endodontic instrument fracture: Causes and prevention. *Br Dent J* 2013; 214: 341-348.
6. La Rosa G, Io Savio F, Pedullà E, Rapisarda E. Developing of a new device for static and dynamic tests of Ni-Ti instruments for root canal treatment. *Procedia Structural Integrity* 2016; 2: 1303-1310.
7. Brantley WA, Svec TA, Iijima M, Powers JM, Grentzer TH. Differential scanning calorimetric studies of nickel

8. Lopes HP, Elias CN, Vieira VT, Moreira EJ, Marques RV, et al. Effects of electropolishing surface treatment on the cyclic fatigue resistance of BioRace nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2010; 36(10): 1653-7.
9. Cheung GSP. Instrument fracture: mechanisms, removal of fragments, and clinical outcomes. *Endod Topics* 2007; 16: 1-26.
10. Shen Y, Coil JM, Zhou H, Zheng Y, Haapasalo M. HyFlex nickel-titanium rotary instruments after clinical use: metallurgical properties. *Int Endod J* 2013; 46(8): 720-9.
11. Oh S, Moon SY, Chaniotis A, Pedullà E, Al-Ghamdi AS, et al. Evaluation of cyclic fatigue and bending resistance of coronal preflaring NiTi file manufactured with different heat treatments. *Appl Sci* 2021; 11(16): 7691.
12. Basrani B, Roth K, Sas G, Kishen A, Peters OA. Torsional profiles of new and used Revo-S rotary instruments: An in vitro study. *J Endod* 2011; 37: 989-992.
13. Yasar S, Ersahan S, Aydın C. Cyclic fatigue of Revo-S nickel-titanium rotary instruments in artificial canals with two different radii of curvature. *Clin Dent Res* 2019; 43(3): 125-130.
14. Kwak SW, Ha JH, Cheung GS, Kim SK, Kim HC. Comparison of In Vitro Torque Generation during Instrumentation with Adaptive Versus Continuous Movement. *J Endod* 2019; 45(6): 803-807.
15. Duque JA, Bramante CM, Duarte MAH, Alcalde MP, Silva EJNL, et al. Cyclic Fatigue Resistance of Nickel-Titanium Reciprocating Instruments after Simulated Clinical Use. *J Endod* 2020; 46: 1771-1775.
16. Kwak SW, Shen Y, Liu H, Zhejun W, Hyeon-Cheol K, et al. Heat Treatment and Surface Treatment of Nickel-Titanium Endodontic Instruments. *Front Dent Med* 2021; 2: 1-6.
17. Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated NiTi alloys - a review. *Int Endod J* 2018; 51(10): 1088-1103.
18. Pereira F, Martins RF, Ginjeira A. Cyclic fatigue resistance of ProTaper gold and comparison with ProTaper universal instruments. *Rev Port Estomatol Med Dent Cir Maxilofac* 2018; 59(2): 75-79.
19. Khalil WA, Natto ZS. Cyclic fatigue, bending resistance, and surface roughness of ProTaper Gold and Edge Evolve files in canals with single- and double-curvature. *Restor Dent Endod*. 2019; 44(2): e19.
20. Tomsic AL. The effect of multiple usages of nickel-titanium rotary endodontic The effect of multiple usages of nickel-titanium rotary endodontic files on cutting efficiency files on cutting efficiency. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports 2009;2787.
21. Kamali SG, Turkyaydin D. Cyclic fatigue resistance and shaping ability of heat-treated nickel-titanium instru-

ments after repeated use. *Niger J Clin Pract* 2021; 24(2): 247-253.

22. Zuolo ML, Walton RE. Instrument deterioration with usage: nickel-titanium versus stainless steel. *Quintessence Int* 1997; 28(6): 397-402.

23. Svec TA, Powers JM. The deterioration of rotary nickel-titanium files under controlled conditions. *J Endod* 2002; 28(2): 105-7.

24. Armagan S, Haznedaroglu F. Scanning electron microscopy analysis of conventional and controlled-memory nickel titanium files before and after multi-uses in root canals. *Microsc Res Tech* 2021; 84(6): 1321-1327.

25. Krishnan V, Nair RS, Ashok L, Angelo MC. An Overview of Thermomechanically Heat-treated Nickel Titanium Alloy Used in Endodontics. *Cons Dent Endod J* 2019; 4: 34-38.

26. Zivkovic S, Jovanovic-Medojevic M, Neskovic J, Popovic-Bajic M. Nickel-titanium files in endodontics: Development, improvement and modifications of nickel-titanium alloy. *Vojnosanit Pregl* 2022; 57.

27. Parashos P, Gordon I, Messer HH. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *J Endod* 2004; 30(10): 722-5.

28. Martins JNR, Silva EJNL, Marques D, Pereira MR, Ginjaia A, et al. Mechanical Performance and Metallurgical Features of ProTaper Universal and 6 Replicalike Systems. *J Endod* 2020; 46(12): 1884-1893.

29. Li UM, Lee BS, Shih CT, Lan WH, Lin CP. Cyclic fatigue of endodontic nickel titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J Endod* 2002; 28(6): 448-51.

30. Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2009; 35(11): 1469-76.

31. Hülsmann M, Donnermeyer D, Schäfer E. A critical appraisal of studies on cyclic fatigue resistance of engine-driven endodontic instruments. *Int Endod J* 2019; 52(10): 1427-1445.

32. De-Deus G, Leal Vieira VT, Nogueira da Silva EJ, Lopes H, Elias CN, et al. Bending resistance and dynamic and static cyclic fatigue life of Reciproc and WaveOne large instruments. *J Endod* 2014; 40(4): 575-9.

33. Neelakantan P, Reddy P, Gutmann JL. Cyclic fatigue of two different single files with varying kinematics in a simulated double-curved canal. *J Investig Clin Dent* 2016; 7(3): 272-7.

34. Keleş A, Eymirli A, Uyanık O, Nagas E. Influence of static and dynamic cyclic fatigue tests on the lifespan of four reciprocating systems at different temperatures. *Int Endod J* 2019; 52(6): 880-886.

35. Ray JJ, Kirkpatrick TC, Rutledge RE. Cyclic fatigue of EndoSequence and K3 rotary files in a dynamic model. *J Endod* 2007; 33(12): 1469-72.

36. Uslu G, Özyürek T, Inan U. Comparison of Cyclic Fa-

tigue Resistance of ProGlider and One G Glide Path Files. *J Endod* 2016; 42(10): 1555-8.

37. Pedullà E, Corsentino G, Ambu E, Rovai F, Campedelli F, et al. Influence of continuous rotation or reciprocation of Optimum Torque Reverse motion on cyclic fatigue resistance of nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J* 2018; 51(5): 522-528.

38. Keskin C, Sivas Yılmaz Ö, Keleş A, Inan U. Comparison of cyclic fatigue resistance of Rotate instrument with reciprocating and continuous rotary nickel-titanium instruments at body temperature in relation to their transformation temperatures. *Clin Oral Investig* 2021; 25(1): 151-157.

39. Bouska J, Justman B, Williamson A, DeLong C, Qian F. Resistance to cyclic fatigue failure of a new endodontic rotary file. *J Endod* 2012; 38(5): 667-9.

40. Chaves Craveiro de Melo M, Guiomar de Azevedo Bahia M, Lopes Buono VT. Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 2002; 28(11): 765-9.

41. Ullmann CJ, Peters OA. Effect of cyclic fatigue on static fracture loads in ProTaper nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2005; 31(3): 183-6.

42. Dosanjh A, Paurazas S, Askar M. The Effect of Temperature on Cyclic Fatigue of Nickel-titanium Rotary Endodontic Instruments. *J Endod* 2017; 43(5): 823-826.

43. Bueno CSP, Oliveira DP, Pelegri RA, Fontana CE, Rocha DGP, et al. Fracture Incidence of WaveOne and Reciproc Files during Root Canal Preparation of up to 3 Posterior Teeth: A Prospective Clinical Study. *J Endod* 2017; 43(5): 705-708.

44. Pessoa OF, da Silva JM, Gavini G. Cyclic fatigue resistance of rotary NiTi instruments after simulated clinical use in curved root canals. *Braz Dent J* 2013; 24(2): 117-20.

45. Gambarini G. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. *Int Endod J* 2001; 34(5): 386-9.

46. Plotino G, Grande NM, Sorci E, Malagnino VA, Somma F. A comparison of cyclic fatigue between used and new Mtwo Ni-Ti rotary instruments. *Int Endod J* 2006; 39(9): 716-23.

47. Grande NM, Plotino G, Silla E, Pedullà E, DeDeus G, et al. Environmental Temperature Drastically Affects Flexural Fatigue Resistance of Nickel-titanium Rotary Files. *J Endod* 2017; 43(7): 1157-1160.

48. La Rosa GRM, Shumakova V, Isola G, Indelicato F, Buggea C, et al. Evaluation of the Cyclic Fatigue of Two Single Files at Body and Room Temperature with Different Radii of Curvature. *Materials (Basel)* 2021; 14(9): 2256.

49. Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G, Castagnola Ret al. Cyclic Fatigue of Reciproc and Reciproc Blue Nickel-titanium Reciprocating Files at Different En-

vironmental Temperatures. *J Endod* 2018; 44(10): 1549-1552.

50. Aksoy S, Erdil I, Hocaoglu E, Inci E, Adas GT, et al. The Role of Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging in the Differential Diagnosis of Simple and Hydatid Cysts of the Liver. *Niger J Clin Pract* 2018; 21(2): 212-216.

51. Goo HJ, Kwak SW, Ha JH, Pedullà E, Kim HC. Mechanical Properties of Various Heat-treated Nickel-titanium Rotary Instruments. *J Endod* 2017; 43(11): 1872-1877.

52. Plotino G, Testarelli L, Al-Sudani D, Pongione G, Grande NM, et al. Fatigue resistance of rotary instruments manufactured using different nickel-titanium alloys: a comparative study. *Odontology* 2014; 102(1): 31-5.

53. Shen Y, Qian W, Abtin H, Gao Y, Haapasalo M. Fatigue testing of controlled memory wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2011; 37(7): 997-1001.

54. Barut N, Odabaşı Tezer E, Öztan M. Cyclic Fatigue Resistance and SEM Evaluation of Fractured Instrument Surfaces; Comparison of ProTaper Universal and ProTaper Gold Files. *European Annals of Dental Sciences* 2022; 49(1): 10-14.

55. Haïkel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 1999; 25(6): 434-40.

56. Faus-Llácer V, Kharrat NH, Ruiz-Sánchez C, Faus-Matoses I, Zubizarreta-Macho Á, et al. The Effect of Taper and Apical Diameter on the Cyclic Fatigue Resistance of Rotary Endodontic Files Using an Experimental Electronic Device. *Appl Sci* 2021; 11(2): 863.

57. Manojkumar T, Vivekanandhan P, Dhakshinamoorthy M, Tamilselvi R, Subbiya A. Evaluation of Cyclic Fatigue Resistance of Three Different Niti Rotary Systems-An In-vitro Study. *Indian J Public Health Res Dev* 2020; 11: 688.

58. Özyürek T. Cyclic Fatigue Resistance of Recipro, WaveOne, and WaveOne Gold Nickel-Titanium Instruments. *J Endod* 2016; 42(10): 1536-9.