



T.C.  
GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

İNCE FİLM TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ METAL BRAKETLER ve  
ARK TELLERİ ARASINDA OLUŞAN SÜRTÜNMENİN  
İNCELENMESİ

Hazırlayan  
Dt. Hikmetnur DANIŞMAN

Ortodonti Ana Bilim Dalı  
Uzmanlık Tezi

Danışman  
Prof. Dr. Ali Altuğ BIÇAKÇI

Ek Danışman  
Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇELEBİ

TOKAT – 2019

T.C.  
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ DEKANLIĞI  
ORTODONTİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI

İNCE FİLM TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ METAL BRAKETLER ve ARK TELLERİ  
ARASINDA OLUŞAN SÜRTÜNMENİN İNCELENMESİ

Tezin Kabul Ediliş Tarihi: 04/ 12 / 2019

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ali Altuğ BIÇAKÇI

Üye : Doç. Dr. Abdullah Alper ÖZ

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Sibel AKBULUT



Bu tez, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Yönetim Kurulunun 19/11/2019 tarih ve 34.06 sayılı oturumunda belirlenen jüri tarafından kabul edilmiştir.

Dekan V. : Prof. Dr. Ataç ÇELİK

Mühür :

İmza :



T.C.  
GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ DEKANLIĞI'NA

Bu belge ile, bu tezdeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak toplanıp sunulduğunu, bu kural ve ilkelerin gereği olarak, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçlara atıf yaptığımı ve kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

(04/12/2019)

Tezi Hazırlayan Öğrencinin

Adı ve Soyadı

Hikmetnur DANIŞMAN

İmzası

.....  


## TEŞEKKÜR

Uzmanlık öğrenimim boyunca bir hekim ve birey olarak bana büyük değerler katan, akademik katkılarıyla yol gösteren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Ali Altuğ BIÇAKÇI'ya;

Uzmanlık öğrenimim boyunca yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen, tecrübesini benimle paylaşan değerli hocalarım Dr. Öğretim Üyesi Feyza HOLOĞLU, Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇELEBİ ve Dr. Öğretim Üyesi Sibel AKBULUT'a;

Tezimde kullandığım braket ve tel kaplamalarının yapılmasını sağlayan sayın Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU'na ve optik profilometre görüntülerini sağlayan sayın Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na;

Uzmanlık eğitimimin ilk dönemlerini her türlü desteği ve yardımıyla kolaylaştıran, dostluğunu her zaman hissettiğim kıdemli asistanım Uzm. Dt. Nesime ÖZDEMİR'e;

Uzmanlık eğitimime birlikte başladığım, bu süreçte zorlukları beraber göğüslediğim ve dostluğunu esirgemeyen sevgili arkadaşım Dt. Zeynep Aybike YELMER'e, varlıkları ve yardımlarıyla uzmanlık sürecimi güzelleştiren değerli arkadaşlarım Dt. Neslihan İZGİ ve Dt. Yıldırım ÖZDEMİR'e;

Birlikte olmaktan büyük mutluluk duyduğum ve özlemlerimle anacağım asistan arkadaşlarıma, çalışma hayatımda katkıları ve emekleri olan personelimize;

Hayatımın her anında, tüm iyi ve kötü zamanlarımda yanımda olup sevgilerini benden esirgemeyen ve tezimi yazmamda çok büyük yardımı ve desteği olan canım annem Şengül DANIŞMAN, canım babam Kenan DANIŞMAN ve canım kardeşim Oğuzhan DANIŞMAN'a her türlü maddi ve manevi desteklerinden dolayı, sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

## ÖZET\*

# İNCE FİLM TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ METAL BRAKETLER ve ARK TELLERİ ARASINDA OLUŞAN SÜRTÜNMENİN İNCELENMESİ

**Amaç:** Bu çalışmanın amacı; braket ve paslanmaz çelik ark tellerine elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar uygulayarak bu materyallerin yüzey özelliklerini geliştirmek ve kaplamasız braket ve tellere göre daha düşük sürtünme kuvvetleri elde etmektir.

**Gereç ve Yöntem:** Çalışmamızda 100 adet paslanmaz çelik sağ üst kanin braketi (0,022 inç slot, Forestadent), 40'ar adet 0,018 inç paslanmaz çelik, 0,019x0,025 inç paslanmaz çelik ve 0,018 inç nikel titanyum ark telleri kullanıldı. Braketlerin (n=50) ve paslanmaz çelik ark tellerinin yarısına (n=20) fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle elmas benzeri karbon (DLC) kaplama uygulandı. Kaplanmış ve kaplanmamış braket ve ark tellerinin birbiriyle oluşturdukları gruplar sürtünme deneylerine tabi tutuldu. Sürtünme deneyleri için Instron universal test cihazı kullanıldı. Her deney farklı braket ark teli çifti ile 10 kez tekrarlandı. Elde edilen kaplamaların karakterizasyonu Raman, SEM ve AFM analizleriyle değerlendirildi.

**Bulgular:** 0,018 paslanmaz çelik tel için hem telin hem braketin kaplamalı olduğu grubun sürtünme kuvveti değerleri diğer gruplardan anlamlı ölçüde düşük bulundu ( $p<0,001$ ). 0,019x0,025 paslanmaz çelik tel için tel ve braketin kaplamalı olduğu grubun sürtünme kuvveti değerleri diğer gruplardan anlamlı ölçüde düşük bulundu. ( $p<0,001$ ) 0,018 nikel titanyum telin kaplamalı braket ile oluşturduğu sürtünme kuvveti değerleri kaplamasız braketle oluşturduğu sürtünme kuvveti değerlerine göre anlamlı ölçüde düşük bulundu. ( $p<0,001$ )

**Sonuç:** Bu çalışma sonucunda DLC kaplamanın tel veya braketler üzerine uygulanmasının sürtünmeyi azaltmada etkili olduğu hem tel hem braket üzerine

uygulanması durumunda ise sinerjik etkiden dolayı statik sürtünme kuvvetinin çok daha fazla azaldığı görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Elmas benzeri karbon, DLC, Kaplama, Sürtünme.

\*Bu çalışma Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 2018/34)

## **ABSTRACT\***

### **EVALUATION OF FRICTION BETWEEN METAL BRACKETS AND ARCH WIRES COATED WITH THIN FILM TECHNIQUE**

**Aim:** The aim of this study was to improve the surface properties of these materials by applying diamond-like carbon (DLC) coatings to brackets and stainless steel archwires and to obtain lower friction forces than uncoated brackets and wires.

**Materials and Methods:** In our study, 100 stainless steel upper right canine brackets (0,022 inch slot, Forestadent), 40 pieces of 0.018 inch, 0,019x0,025 inch stainless steel archwires and 40 pieces of 0,018 inch nickel titanium archwires were used. Half of the brackets (n=50) and stainless steel arch wires (n = 20) were coated with diamond-like carbon (DLC) by physical vapor deposition (PVD) method. Friction experiments were applied to the groups of coated and uncoated brackets and arch wires. Instron universal test device was used for friction tests. Each experiment was repeated 10 times with a different pair of bracket archwires. Characterization of applied coatings was evaluated by Raman, SEM and AFM analyzes.

**Results:** For the 0.018 ss wire, the friction force values of the group in which both the wire and the bracket were coated were significantly lower than the other groups (p <0.001). For 0.019x0.025 ss wire, friction force values of both wire and bracket coated group were found to be significantly lower than other groups. (p <0.001). The

friction force values of 0.018 niti wire with the coated bracket were significantly lower than the friction force values of the uncoated bracket.

**Conclusion:** As a result of this study, it has been observed that the application of DLC coating on wire or brackets is effective in reducing friction and when applied on both wire and bracket, static friction force decreases much more due to synergistic effect.

**KEYWORDS:** Diamond like carbon, DLC, Coatings, Friction.

\*This work was supported by the Gaziosmanpasa University Scientific Research Projects Commission. (Project No: 2018/34)

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>ÖZET*</b> .....	iv
<b>ABSTRACT*</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	x
<b>ŞEKİLLER ve RESİMLER LİSTESİ</b> .....	xii
<b>KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	5
2.1. SÜRTÜNME.....	5
2.1.1. Sürtünmenin Tanımı.....	5
2.1.2. Statik ve Kinetik Sürtünme.....	6
2.1.3. Sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalar ve tarihçesi.....	7
2.1.4. Sürtünmenin Ortodontideki Önemi.....	8
2.2. SÜRTÜNMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	10
2.2.1. Fiziksel Faktörler.....	11
2.2.2. Biyolojik Faktörler.....	28



2.3. SÜRTÜNMEYİ AZALTMA AMAÇLI YAPILAN YÜZEY ÇALIŞMALARI.....	32
2.3.1. İnce Film Kaplamalar.....	33
2.3.2. İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	39
2.4. YÜZEY ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	45
2.4.1. SEM Analizi.....	45
2.4.2. AFM Analizi.....	46
2.4.3. XRD Analizi.....	47
2.4.4. Raman Analizi.....	47
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>48</b>
3.1. KULLANILAN MATERYALLER.....	48
3.2. NUMUNELERİN KAPLAMA İÇİN HAZIRLANMASI.....	49
3.3. NUMUNELERİN KAPLANMASI.....	50
3.4. TEST DÜZENİĞİNİN HAZIRLANMASI VE SÜRTÜNME TESTLERİ.....	52
3.5. YÜZEY ANALİZ TESTLERİ.....	58
3.5.1. Raman Analizi.....	58
3.5.2. SEM ve XRD Analizi.....	58
3.5.3. AFM Analizi.....	60
3.6. İSTATİSTİKSEL ANALİZ.....	60
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>61</b>
4.1. SÜRTÜNME KUVVETİ İLE İLGİLİ BULGULAR.....	61
4.2. YÜZEY ANALİZLERİ İLE İLGİLİ BULGULAR.....	70
4.2.1. SEM Analizi Bulguları.....	70
4.2.2. EDX Analizi, Kaplama Bileşimleri ve Faz Yapıları.....	72
4.2.3. Kaplama Karakterizasyonu.....	75

4.2.4. Kaplama Sertlikleri ve Yüzey Pürüzlülükleri.....	77
4.2.5. RAMAN Analizinin Değerlendirilmesi.....	80
<b>5. TARTIŞMA.....</b>	<b>81</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>99</b>
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>100</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>110</b>

## TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Termal Kaplama Yöntemleri.....	40
Tablo 3.1. 0.018 çelik tel ve braket grupları .....	48
Tablo 3.2. 0.019x0.025 çelik tel ve braket grupları.....	49
Tablo 3.3. 0.018 ni-ti tel ve braket grupları .....	49
Tablo 4.1. Sürtünme kuvveti değerleri ortalama $\pm$ standart sapma olarak ifade edilmiştir(0,018 ss).....	61
Tablo 4.2. Sürtünme kuvveti değerleri ortalama $\pm$ standart sapma olarak ifade edilmiştir(0,010x0.025 ss) ss).....	61
Tablo 4.3. Sürtünme kuvveti değerleri ortalama $\pm$ standart sapma olarak ifade edilmiştir(0,018 niti).....	62
Tablo 4.4. Kaplamasız braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	63
Tablo 4.5. Kaplamalı braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	63
Tablo 4.6. Kaplamasız braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	64
Tablo 4.7. Kaplamalı braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	64
Tablo 4.8. Kaplamasız braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	66
Tablo 4.9. Kaplamalı braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	66
Tablo 4.10. Kaplamasız braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	66
Tablo 4.11. Kaplamalı braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması.....	67
Tablo 4.12. 0,018 ni-ti telin kaplamalı ve kaplamasız braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	68
Tablo 4.13. Resim 4.1.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi.....	72
Tablo 4.14. Resim 4.2.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi.....	73
Tablo 4.15. Resim 4.3.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi.....	74

Tablo 4.16. Resim 4.4.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi (Kaplama tel).....	75
Tablo 4.17. Kaplamasız ve kaplamalı tellerin yüzey pürüzlülükleri.....	78
Tablo 5.1. 0.018 çelik tel ve braket grupları. Ss ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir....	91
Tablo 5.2. 0.019x0.025 çelik tel ve braket grupları. Ss ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.....	92
Tablo 5.3. 0.018 ni-ti tel ve braket grupları. Ss ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir....	92

## ŞEKİL VE RESİM LİSTESİ

Şekil 2.1. Sürtünme kuvvetinin şeması ( $F_f = F_n \cdot \mu$ ).....	5
Şekil 2.2. Sürtünme eğrisi grafiği. Cismi harekete zorlayan kuvvet arttıkça sürtünme kuvveti de artar. Statik sürtünme direnci aşıldığı anda cisim harekete başlar ve kinetik sürtünme devreye girer.....	6
Şekil 2.3. Kritik kontakt açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve pasif konfigürasyonda $\theta < \theta_c$ 'dir. Bu durumda $RS = FR$ (Articolo ve Kusy, 1999).....	20
Şekil 2.4. Kritik kontakt açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve aktif konfigürasyonda $\theta = \theta_c$ 'dir. Bu durumda $RS = FR + BI$ (Articolo ve Kusy, 1999).....	21
Şekil 2.5. Kritik kontakt açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve aktif konfigürasyonda $\theta \gg \theta_c$ olduğu durumlarda $RS = FR + BI + NO$ ..	22
Şekil 2.6. 0,022 inç slot genişliğine sahip bir braket slotu ile bitim aşamasında kullanılan 0,019x0,025 inç tel arasında kalan boşluk sebebiyle ark teli braketin içinde belli bir açığa kadar ( $\Theta$ ) hareket edebilmekte, bu, sürtünmeyi azaltırken, fazladan tork kuvveti uygulanması ihtiyacı doğurabilmektedir.....	25
Şekil 2.7. Üçlü faz diyagramı çeşitli DL filmleri ve diğer karbon filmleri göstermektedir.....	36
Şekil 2.8. Magnetron sıçratma sistemi.....	44
Şekil 3.1. Uzama-Sürtünme kuvveti grafiği.....	58
Şekil 4.1. 0,018 ss tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği.....	64
Şekil 4.2. 0,019x0,025 ss tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği.....	67
Şekil 4.3. 0,018 ni-ti tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği.....	68
Şekil 4.4. Bütün grupların sürtünme değerleri grafiği.....	68
Şekil 4.5. Kaplamasız tellerin kaplamalı ve kaplamasız braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetindeki değişim grafiği.....	69

Şekil 4.6. Kaplamalı tellerin kaplamasız ve kaplamalı braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetindeki değişim grafiği.....	69
Şekil 4.7. Resim 4.1.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamasız braket).....	72
Şekil 4.8. Resim 4.2.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamalı braket).....	73
Şekil 4.9. Resim 4.3.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamasız tel).....	74
Şekil 4.10. Resim 4.4.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları (Kaplamalı tel).....	75
Şekil 4.11. Kaplamalı Braket Numunesinin Raman spektroskopisindeki görüntüsü (Raman shift, cm-1).....	80
Şekil 4.12. Kaplamalı Tel Numunesinin Raman spektroskopisindeki görüntüsü (Raman shift, cm-1).....	80
Resim 3.1. Kaplama ünitesine yerleştirilen braketlerin yerleştirildiği taşıyıcı levha....	50
Resim 3.2. Manyetik alanda sıçratma kaplama ünitesi.....	52
Resim 3.3. Kaplama sonrası numunelerin görünümü.....	52
Resim 3.4. Braketlerin yapıştırıldığı metal plakalar.....	53
Resim 3.5. Kompozit ve bond.....	54
Resim 3.6. Elastik ligatür.....	54
Resim 3.7. Kaplanmış braket(a), kaplanmamış braket(b).....	54
Resim 3.8. Braket plakalara yapıştırılmış ve ark teli elastik ligatür ile braketlere bağlanmıştır.....	55
Resim 3.9. Taşıyıcı alüminyum çerçeve.....	55
Resim 3.10. İnstron test cihazı.....	56
Resim 3.11. 1-ark teli, 2-braket, 3-ağırlık.....	56
Resim 3.12. Verilerin elde edildiği yazılım programı.....	57
Resim 3.13. Sem ve XRD Cihazı .....	59
Resim 3.14. Analizlerin görüntülenmesi.....	59
Resim 3.15. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	60
Resim 4.1. a) Kaplamasız braketin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü .....	70
Resim 4.2. a) Kaplamalı braketin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü.....	70
Resim 4.3. a) Kaplamasız SS ark telinin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü.....	71
Resim 4.4. a) Kaplamasız SS ark telinin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü.....	71

Resim 4.5. 53 KX büyütme yapılmış DLC kaplamalı Si numunesine ait kırık kesit SEM görüntüsü.....	76
Resim 4.6. 100 KX Büyütme DLC kaplamalı Si numunesine ait kırık kesit SEM görüntüsü ve kaplama kalınlığı.....	76
Resim 4.7. Kaplamasız ark telinin AFM Analizi a) 50 $\mu\text{m}$ tarama alanında yüzey, b) 10 $\mu\text{m}$ tarama alanında yüzey, c) üç boyutlu yüzey yapıları, d) pürüzlülük sahası, e) pürüzlülük sahasında değişim.....	79
Resim 4.8. . Kaplamalı ark telinin AFM Analizi a) 50 $\mu\text{m}$ tarama alanında yüzey, b) 10 $\mu\text{m}$ tarama alanında yüzey, c) üç boyutlu yüzey yapıları, d) pürüzlülük sahası, e) pürüzlülük sahasında değişim.....	79



## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**Ss:** Paslanmaz çelik

**niti:** Nikel titanyum

**n:** Kişi sayısı

**Ort:** Ortalama

**SS:** Standart sapma

**p:** İstatistiksel anlamlılık

**µm:** mikrometre

**nm:** nanometre

**Ti:** Titanyum

**TiN:** Titanyum Nitrür

**TiAlN:** Titanyum Alüminyum Nitrür

**ZrN:** Zirkonyum Nitrür

**Si:** Silisyum

**DLC:** Diamond Like Carbon

**PVD:** Physical Vapor Deposition

**FR:** Klasik Sürtünme

**BI:** Binding (Kilitlenme)

**NO:** Notching (Çentiklenme)

**SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu

**AFM:** Atomik Kuvvet Mikroskobu

**XRD:** X ışını kırınımı



## 1. GİRİŞ

Sürtünme kuvveti, temas halindeki iki cismin hareketi sırasında ortaya çıkan temas yüzeyine teğet, hareket yönüne zıt yönlü olarak ortaya çıkan ve cisimlerin hareketine direnç gösteren bir kuvvettir(Drescher ve ark., 1989). Ortodontide sürtünmeye en sık, dişe kuvvet uygulanması ile dişin braket yardımıyla bir ark teli boyunca hareket ettirilmesini sağlayan ve kayma mekaniği olarak adlandırılan mekanikte rastlanır(Farrant, 1977). Bu kayma hareketi sırasında, braket ve ark teli ara yüzeyinde istenen diş hareketine paralel ancak zıt yönlü bir sürtünme direnci ortaya çıkmaktadır(Bednar, 1991). Ortaya çıkan bu sürtünme direnci, ortodontik tedavinin süresini ve sonuçlarını doğrudan etkilemektedir(Franchi ve ark., 2008). Ortodontik kuvvetlerin dişte hareket meydana getirebilmesi için bu sürtünme direnci aşılmalıdır(Angolkar ve ark., 1990; Ogata ve ark., 1996). Kojima ve Fukui, 2005 yılında yaptıkları çalışmalarında kanin distalizasyonunda uygulanan kuvvetin %60-80'inin sürtünme ile kaybedildiğini rapor etmişlerdir(Kojima ve Fukui, 2005). Kusy ve Whitley ise sürtünmeden dolayı uygulanan kuvvetin %12-60'ının kaybedildiğini bildirmişlerdir(Kusy ve Whitley, 1997). Böyle bir durumda diş hareketini başlatabilmek için uygulanan kuvvetin etkinliği azalmakta ve artan sürtünme kuvvetiyle birlikte orantılı olarak daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır(Frank ve Nikolai, 1980). Artan sürtünme kuvvetinin aşılması için uygulanacak fazla ortodontik kuvvetler; diş çevreleyen dokularda yıkıcı etkiler, dişin hareket etmemesi ve ankraj alınan dişin hareketi gibi istenmeyen yan etkiler meydana getirebilmektedir(Keith ve ark., 1993; Tanne ve ark., 1994; Vaughan ve ark., 1995; Ogata ve ark., 1996; Taylor ve Ison, 1996). Özellikle ankrajın kritik olduğu vakalarda bu şekilde ankraj kaybetmek, tedavi süresinin uzaması ve tedavi sonuçlarının istenen seviyede olmamasına sebep olmaktadır(Read-Ward ve ark., 1997; Nanda ve Uribe, 2009). Bu sebeple optimum biyolojik yanıt ve istenen diş hareketinin oluşması için sürtünmenin etkisinin anlaşılması ve sürtünme kuvvetinin analizi şarttır(Nishio ve ark., 2004).

Sürtünme kuvveti tamamen yok edilebilecek bir kuvvet olmamakla birlikte azaltılması mümkündür. Sürtünme kuvvetini azaltabilmek için sürtünmeyi etkileyen faktörlerin bilinmesi gerekmektedir. Sürtünme olgusu çok yönlüdür. Ortodonti

literatürü, braket ve ark teli arasında oluşan sürtünme kuvvetlerini etkileyen sayısız değişken olduğunu göstermektedir. Diş hareketi sırasında oluşan direnç fiziksel veya biyolojik parametrelere bağlı olabilir. Kullanılan ark teli ve braketin malzemesi, boyutu, yüzey yapısı, çapı, ligatür materyali, ligasyon metodu gibi fiziksel faktörler ve tükürük, artık birikimi gibi biyolojik faktörler sürtünme direnci üzerinde etkilidir. Sürtünme kuvvetini azaltmak için geçmişten günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı braket tasarımları yapılmış, braket ve ark tellerinin malzeme yapıları değiştirilmiş, farklı ligasyon metotları ve malzemeleri kullanılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak Franchi ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları konvansiyonel olmayan elastomerik ligatürler verilebilir(Franchi ve ark., 2008). Ligasyonu ortadan kaldıran kendinden bağlanan braket tasarımları da yine sürtünme kuvvetlerini azaltmak için geliştirilmiştir. Bu braketlerin konvansiyonel braketlerle karşılaştırıldığında sürtünme kuvvetini azalttığını gösteren pek çok çalışma mevcuttur(Araújo ve ark., 2014; Cacciafesta, Sfondrini, Ricciardi, ve ark., 2003; T. Huang ve ark., 2011; Loftus ve ark., 1999; Woodside ve ark., 2005). Bu çalışmalara ek olarak malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirerek de sürtünme kuvvetlerini kontrol altına almak mümkündür. Ark tellerinin ve braketlerin yüzeyini çeşitli teknikler ve malzemeler kullanarak kaplamak ortodontide kullanılan materyallerin hem mekanik hem de biyolojik özelliklerini geliştirmek için kullanılan yöntemler arasındadır(Arango ve ark., 2013). Bu amaçla kullanılan kaplamalar arasında, Ti (titanyum), TiN (titanyum nitrür), ZrN (zirkonyum nitrür), TiAlN (titanyum alüminyum nitrür) ve DLC (elmas benzeri karbon) gibi birçok kaplama vardır. Bu kaplamaların genel olarak yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, pürüzsüzlük gibi özellikleri sayesinde sürtünmeyi azalttıkları bildirilmiştir.

Bu kaplamalar arasında en dikkat çekici olanlardan biri elmas benzeri karbon kaplamalardır ve popülariteleri zaman içinde artmaktadır. DLC, herhangi bir elmas  $sp^3$  bağı parçası içeren kaplamalar için kullanılan genel bir terimdir ve filmdeki hidrojen miktarına bakılmaksızın “elmas benzeri” özelliklere yol açar. DLC filmleri, ilk defa 1970’li yılların başında Aisenberg ve Chabot tarafından materyaller üzerine biriktirilmiştir ve tüm dünyada araştırmalara konu olmaya başlamıştır(Sol Aisenberg ve Chabot, 1971). Son dönemlerde yapılan çalışmalar ortodontik materyallerin DLC ile kaplanmasının sürtünme özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir(S. Huang ve ark.,

2013; T. Kang ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011).

Katz ve arkadaşları, ortodontik diş hareketi sırasında meydana gelen sürtünmeyi azaltmak için süperkaygan materyal kullanarak yaptıkları çalışmada, fulleren benzeri WS2 (IF) nanopartikülleri ile kaplanmış tel ve kaplanmamış paslanmaz çelik üst sağ keser braket kullanmışlar ve sürtünmenin önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır(Katz ve ark., 2006).

Muguruma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, paslanmaz çelik konvansiyonel braketleri plazma sıçratma tekniği (PBIID-plasma based ion implantation/ deposition) kullanarak elmas benzeri karbon ile kaplamış ve kaplı olmayan paslanmaz çelik tel ile oluşturdukları sürtünme kuvvetlerini incelemiştir. Çalışma sonucunda kaplanmış braket sisteminde sürtünmenin anlamlı ölçüde azaldığı bulunmuştur(Muguruma ve ark., 2013).

Huang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise elmas benzeri karbon kaplı konvansiyonel braketler ile titanyum nitrür kaplı konvansiyonel braketler karşılaştırılmış olup, elmas benzeri karbon kaplı braket ve kaplı olmayan paslanmaz çelik tel çiftinde, titanyum nitrür kaplı braket ve kaplı olmayan paslanmaz çelik tel çiftine göre daha düşük sürtünme değerleri bulunmuş, elmas benzeri karbon kaplamanın, titanyum nitrür kaplamaya üstün olduğu belirtilmiştir(Huang ve ark., 2010).

Yukarıda bahsetmiş olduğumuz çalışmalarda, sürtünme kuvvetlerinin ince filmlerle kaplı ortodontik braket ya da ark teli kullanıldığında önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle temasta olan cisimlerden sadece birine (ark teli veya braket) ince film kaplama yapılmış ve alınan sonuçlar kaplamanın sürtünmeyi azaltmada oldukça etkin olduğunu göstermiştir. Ancak literatürde iki yüzeyin de kaplanarak sürtünme kuvvetinin ölçüldüğü çok az çalışmaya rastlanılmıştır(T. Kang ve ark., 2015). Bizim çalışmamızda, her iki yüzeyin elmas benzeri karbon ile kaplandığı durumlarda atomların birbirlerine karşı manyetik itiş güçlerinden de faydalanılarak sürtünme kuvvetinin çok daha fazla miktarda azaltılabileceği düşünülmüştür (Sinerjik etki). Bu bilgiler doğrultusunda çalışmamızda ortodontik ark telleri ve braket arasında meydana gelen, diş hareketini engelleyen ya da

azaltan sürtünme kuvvetlerinin en aza indirilmesi, böylece ortodontik tedavi sırasında oluşabilecek problemlerin önlenip, tedavi süresinin kısaltılması amaçlanmıştır. Çalışmamızda, yuvarlak ve köşeli paslanmaz elik ortodontik teller ve braketler sperkaygan özellik gösteren elmas benzeri karbon(DLC) nanopartikülleri ile kaplanm ve sürtünme kuvveti değerleri kaplanmam tel ve braketlerin oluşturduğu değerler ile karılatırılmtır.



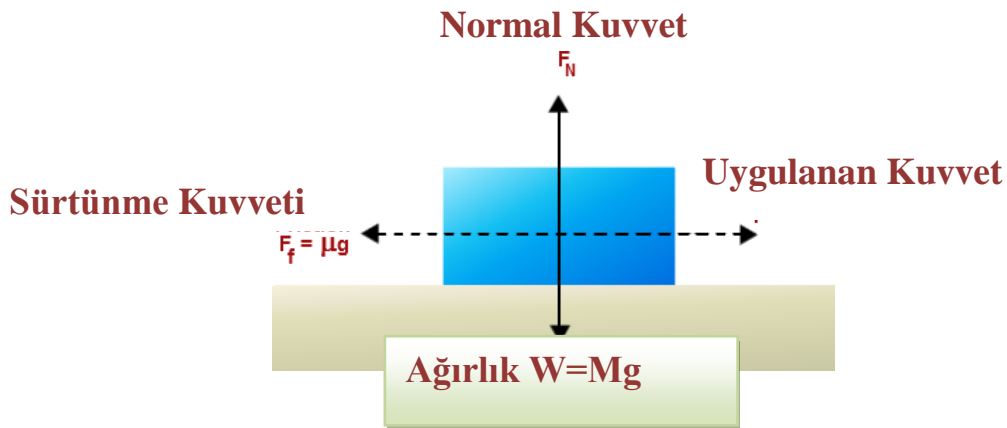
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. SÜRTÜNME

#### 2.1.1. Sürtünmenin Tanımı

Sürtünme kuvveti, temasta olan iki maddenin hareketini yavaşlatan veya engelleyen, uygulanan kuvvete zıt ve maddelerin temas yüzeyine teğet uzanan kuvvettir(Czichos, 2009). Bu kuvvet iki cismin birbirine temasta kalmasını sağlayan normal kuvvet ile doğru orantılıdır(Baker ve ark., 1987) ve katı, sıvı veya gazlar arasında olabilir(Nikolai, 1985). Ortodontik olarak ise sürtünme kuvveti; bir ortodontistin dişleri hareket ettirmek için yaptığı her hamleye karşı koyan bir kuvvet olarak tanımlanabilir(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997).

Temas halindeki iki yüzey birbirleri üzerinde kayarken ortaya çıkan toplam kuvvetin iki bileşeni vardır; Sürtünme kuvveti bileşeni ( $F_f$ ), uygulanan kuvvete paralel ancak zıt yönlüdür diğer bileşen ise temas yüzeylerine ve sürtünme kuvvetine dik olan normal kuvvet ( $F_n$ )'dir(Dickson ve ark., 1994). Sürtünme kuvveti, cisimlerin temas eden yüzeylerinin pürüzlülük derecesine ve birbirlerine doğru uygulanan kuvvete bağlıdır ve  $F_f = \mu N$  şeklinde tanımlanır. (Şekil 2.1.)  $F$  sürtünme kuvvetini,  $\mu$  sürtünme katsayısını,  $N$  ise temas eden yüzeyler arasında oluşan ve hareket yönüne dik etki eden kuvveti ifade etmektedir(Khambay ve ark., 2005; D. J. Michelberger ve ark., 2000). Sürtünme katsayısı 0 ile 1 arasında bir değere sahip olup büyüklüğü esas olarak temas eden malzemelerin doğasına bağlıdır(Gamow ve Cleveland, 1960).



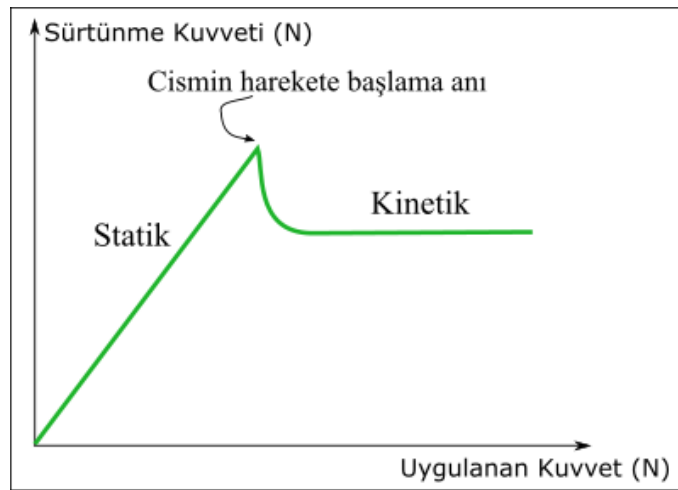
Şekil 2.1. Sürtünme kuvvetinin şeması ( $F_f = F_n \cdot \mu$ )

### 2.1.2. Statik ve Kinetik Sürtünme

**Statik sürtünme;** birbirleriyle temas halindeki katı yüzeylerin hareketini başlatmak için gereken en küçük kuvvettir(Omana, 1992).

**Kinetik sürtünme;** ise cismin hareketi esnasında var olan sürtünmedir ve cismin hareketini sürdürebilmesi için bu kuvveti yenmesi gerekmektedir(Tosun, 1999).

Ortodontide de diş hareketini başlatabilmek için ark teli ve braket arasında oluşan sürtünme kuvvetinin üstesinden gelinmelidir(Bednar ve ark., 1991). Şekil 2.2.'deki grafiğinde gösterdiği gibi cisim hareket etmeye zorlandığında sürtünme kuvveti de uygulanan kuvvetle doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu, statik sürtünmeyi gösterir. Hareket için zorlayan kuvvet değeri optimal seviyeye ulaştığında statik sürtünme aşılır ve cisim hareket etmeye başlar. Bu noktadan itibaren kinetik sürtünmeden bahsedilir. Kinetik sürtünme statik sürtünmeden daha düşük değerlere sahiptir.



**Şekil 2.2.** Sürtünme eğrisi grafiği. Cismi harekete zorlayan kuvvet arttıkça sürtünme kuvveti de artar. Statik sürtünme direnci aşıldığı anda cisim harekete başlar ve kinetik sürtünme devreye girer.

### 2.1.3. Sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalar ve tarihçesi

Leonardo Da Vinci (1452-1519) sürtünmeyi sistematik olarak inceleyen ilk araştırmacılardan biriydi. Blokların düz yüzeyler üstünde kaydığını gösteren ünlü çizimleri, katı cisimler arasındaki sürtünmenin temelini göstermek için hala kullanılmaktadır(Courtel R. , 1964). Guillaume Amontons (1663-1705), Leonardo Da Vinci tarafından keşfedilen iki temel sürtünme kanununu yeniden gündeme getirdi ve bunu geliştirerek özgün bir teori oluşturdu(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997). Coulomb(1736-1805) Amonton yasasını genişleten ve matematiksel bir forma sokan ilk kişiydi ve bu iki yasaya ek olarak üçüncü bir yasa ekledi. Amontons-Coulomb yasası denen bu yasalar;

- 1- Sürtünme kuvveti uygulanan kuvvet ile doğru orantılıdır.(Amontons yasası)
- 2- Sürtünme katsayısı temas alanından bağımsızdır.(Amontons yasası)
- 3- Sürtünme katsayısı iki maddenin birbirleri üstündeki kayma hızından bağımsızdır.(Coulomb yasası)(Jastrzebski, 1976)

Ortodontide bu klasik sürtünme yasalarından birinci ve ikinci yasaya uyulurken(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997) üçüncü yasaya ise her zaman uyulmamaktadır(R. Kusy ve Whitley, 1989).

Bir katı yüzeyin bir başkasının üzerindeki hareketi temelde hem yapay hem de doğal birçok mekanizmanın işleyişi için önemlidir. 20.yüzyıl ortalarında bununla ilgilenen bir bilim dalı olan triboloji ortaya çıkmıştır. Triboloji sözcüğü eski Yunancada sürtünme anlamına gelen “*tribos*” kelimesinden türetilmiştir ve “*sürtünme bilimi*” anlamına gelmektedir(Stachowiak ve Batchelor, 1993). Triboloji, karşılıklı etkileşim halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan yüzeyler (malzemeler) arasındaki sürtünme, aşınma, yağlama olayları ve bu olaylar arasındaki ilişkilerin sonuçları ile ilgilenen bilim ve teknolojinin bir dalı olarak tanımlanır(Hutchings ve Shipway, 2017). Triboloji bu etkileşimi incelemenin yanı sıra, etkileşimden kaynaklanan problemlere de çözüm bulmaya çalışmaktadır(Bhushan, 2000). Tribolojinin kapsadığı alan çok geniş olsa da, sürtünme birçok mekanik sistemin performansında merkezi bir rol oynamaktadır.

#### 2.1.4. Sürtünmenin Ortodontideki Önemi

Ortodontik diş hareketi için gereken optimal kuvvet düzeyi; dişlerin hareketi için maksimum yanıt üreten basıncı oluşturan en düşük kuvvettir(Proffit, 2013). Tüm mekanik sistemlerde olduğu gibi, ortodontik tedavi mekaniklerinde de hareket ile beraber sürtünme oluşmaktadır. Ortaya çıkan sürtünme direncini aşmak ve etkinliği artırabilmek için uygulanan fazla kuvvetler diş hareketini sağlamada etkili olsa bile, gereksiz bir travmatik duruma ve ankraj üstünde stres oluşmasına neden olacaktır(Proffit, 2013).

Ortodontistler sabit mekaniklerle tedavi sırasında çeşitli aşamalarda sürtünme direnciyle karşılaşır ve bu sürtünme direncini aşmaları gerekir. Sürtünme ile ilk karşılaşılan yer başlangıç seviyeleme hizalama aşamasıdır. Bu aşamada nikel titanyum teller kullanılır. Bu teller çapraşık olan dişlere bağlandığı zaman aktive olurlar ve sahip oldukları şekil hafıza özelliği sayesinde düzleşmeye çalışırlar. Bu esnada komşu dişlerin braketleri içinde kayarlar ve sürtünme kuvveti bu noktada önemli bir role sahiptir(Meir Redlich ve Tenne, 2013). Tedavinin ilerleyen aşamalarında nikel titanyum teller yerlerini çelik tellere bırakır ve diş hareketine başlanır. Sürtünmenin ikinci defa devreye girdiği nokta diş hareketi safhasıdır. Sabit ortodontik tedavilerde sürtünme kuvveti, braket slotu veya molar tüplerinin içerisindeki tellere rehberlik ettiği tek diş veya diş grubunun meziodistal hareketleri sırasında oluşur. Klinik uygulamalarda en sık karşılaşılan durumlar; küçük azı dişi çekimi yapılmış vakalarda kanin distalizasyonu sırasında ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin, diş hızını yavaşlatması ve ön grup dişlerin retraksiyonu sırasında arka grup dişler ile ark teli arasında oluşan sürtünmeden dolayı ark telinin hareketinin kısıtlanması sonucu tedavi süresini uzatması ve ankraj kayıplarına yol açmasıdır(Frank ve Nikolai, 1980).

Ortodontik tedavide diş hareket ettirmek ve boşluk kapatmak için kullanılan farklı teknikler mevcuttur. Birincisi segmental veya bölümlü ark tekniği denilen paslanmaz çelik veya TMA ark tellerine çeşitli loop bükümleri yapılarak uygulanan tekniktir. Bu teknikte braket ve tüpler ark teli boyunca kaymadığı için sürtünme oluşmaz ve bu teknik aynı zamanda “**sürtünmesiz mekanik**” olarak da adlandırılır(Schroff, 1995). Fakat hastaya özel yapılacak bükümler iş yükünü artırarak



seans süresini uzattığı gibi bu loop bükümlerinin uygun yapılmaması hastanın konforunu azaltabilmektedir(Staggers, 1991). Diğer teknik ise günümüzde çok kullanılan tekniklerden biri olan kayma mekanikleridir. Ortodonti pratiğinde sık kullanılan bu sabit mekaniklerde dişler braketler aracılığıyla bağlandıkları ark telleri üzerinde kayarak hareket etmektedirler. Kayma mekaniklerinin kullanımı esnasında braket ve ark teli arasında istenen diş hareketine zıt yönlü bir sürtünme direnci ortaya çıkmaktadır ve bu tekniğin en büyük dezavantajlarından biridir(Bednar ve ark., 1991). Kayma mekaniklerinde sürtünmenin etkisi büyük olduğundan “**sürtünmeli mekanik**” olarak da adlandırılmaktadır(Omana, 1992). Bu mekanikte sürtünme direnci ortaya çıksa da uygulanmasının daha kolay olması, seans süresini kısaltması, hasta konforunu artırması gibi avantajlarından dolayı bölümlü ark tekniğine göre daha çok tercih edilmektedir(Pacheco ve ark., 2012).

Braket tel üzerinde kayarken kontakt noktaları üzerinde oluşan kuvvetten kaynaklanan bir sürtünme meydana gelir. Bu kuvvetin komponentleri; ark telinin hizalanmamış dişlere bağlanması, ark telini slot tabanına doğru zorlayan ligatür baskısı, köşeli tellerdeki aktif tork ve braket ark teli arasında oluşan iki nokta teması ile tippingin engellenmesi sonucu oluşan paralel diş hareketidir(Tidy ve Orth, 1989). Ortodontik kuvvetlerin dişte hareket meydana getirebilmesi için, meydana gelen bu sürtünme direncinin üstesinden gelinmelidir(Angolkar ve ark., 1990).

Dişlerin ark teli üzerindeki hareketi sürekli tipte kesintisiz bir hareket değildir. Devrilme ve dikleşme hareketlerinden oluşan hareket dizisi şeklindedir. Kayma mekaniğiyle boşluk kapatılırken uygulanan retraksiyon kuvveti dişin kronunda bir devrilme momenti oluşturur ve kron hareketi kök hareketinden önce gerçekleşir. Kron tippingine neden olan bu moment, uygulanan kuvvetin direnç merkezine göre konumunun ve diş hareketine karşı gösterilen direnç miktarının birleşimi ile belirlenir(Drescher ve ark., 1989; Yamaguchi ve ark., 1996). Bu ardışık devrilme ve kök dikleşmesi hareketleri esnasında her aktivasyon başlangıcında etkili olan statik sürtünmedir. Bu sebeple pek çok araştırmacı statik sürtünme kuvvetinin kinetik sürtünme kuvvetinden daha fazla önem kazandığını dile getirmiştir(Chimenti ve ark., 2005; Jones ve ark., 2002; Omana, 1992; Meir Redlich ve Tenne, 2013). Fakat hiyalinizasyon dokusu ortadan kalktığında kinetik sürtünme kuvvetinin de önem

kazandığını söyleyen araştırmacılar vardır(Nanda ve Ghosh, 1997). Klinik olarak, alveoler soketteki diş hareketi, uygulanan retraksiyon kuvveti, periodontal destek dokularının direncini ve braketteki sürtünme kuvvetini aştığında başlar. Uygulanan retraksiyon kuvveti, direnç kuvveti, sürtünme kuvveti ve telin esnekliği ile dengelendiği zaman diş hareketi durur. Buna sürtünme kilitlemesi denir(Tidy ve Orth, 1989). Periodontal destek dokularının remodelingi ve dişlerin oklüzal teması nedeniyle oluşan diş mobilitesi bu kilitlemeyi kaldırır. Daha sonra, statik sürtünme kuvveti azalır ve kayma hareketi tekrar başlar(Yamaguchi ve ark., 1996).

Köpek dişi retraksiyonu sırasında diş hareketinin değişik safhalarında braket ile ark teli arasındaki temas sürekli değişir. Yukarıda bahsedilen dişin devrilme hareketine başlamasıyla birlikte braket slotu ve ark teli arasındaki açı artar ve temas alanı braket slotunun köşelerine taşınır. Farklı temas alanlarının sürtünmeye etkisi de farklıdır. Fakat diş harekete bir kere başladığı zaman temas alanı veya hareket hızı sürtünme kuvvetlerini etkilemez(Nanda, 1997). Kusy ve Whitley kaymaya karşı oluşan sürtünme direnci nedeniyle uygulanan kuvvetin %12 ila %60 arasında kaybedilebileceğini söylemişlerdir(Kusy ve Whitley, 1997). Yapılan bir başka çalışmada kanin distalizasyonu sırasında uygulanan kuvvetin %60-80'inin sürtünme ile kaybedildiği rapor edilmiştir(Kojima ve Fukui, 2005).

Ortodontistler, sürtünmenin üstesinden gelebilmek için net kuvvet seviyeleri elde etmek ve verimli diş hareketleri için optimal bir biyolojik tepki elde etmek için braket-tel arasında ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerini nicel bir değerlendirmeye tabi tutmak zorundadırlar(Angolkar ve ark., 1990; Ogata ve ark., 1996). Bunun için braket-ark teli arasındaki sürtünmeyi etkileyen faktörleri bilmek büyük önem taşımaktadır ve bu faktörleri araştıran ve inceleyen birçok çalışma yapılmıştır.

## **2.2. SÜRTÜNMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Braket slotuna ark telinin takılması durumunda çeşitli faktörler sürtünme kuvvetini etkiler ve sürtünme katsayısı büyük önem taşır. Bu etkileşim esnasında oluşan sürtünme kuvveti; ortodontik tedavi sırasında ortodontistin karşısına çıkan en büyük sorunlardan biri olup, sürtünme kuvvetinin miktarı; braketin ve uygulanan ark telinin

malzemesi, bunların boyutu ve şekli, genişlik ve slot özellikleri, temas eden yüzeylerin yüzey bileşimi, pürüzlülüğü ve temizliği, interbraket mesafesi, braketin üretim tekniği, ark telinin çapı, kesiti ve ligatür materyali, ark telini braket yatağına ligatürleme şekli gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir(Drescher ve ark., 1989).

### 2.2.1. Fiziksel Faktörler

#### Ark Teliyle İlgili Faktörler

- Ark telinin materyali
- Ark telinin çapı ve kesiti
- Ark telinin yüzey yapısı ve sertliği

#### Braket ile ilgili Faktörler

- Braket materyali
- Braketin genişliği
- Braketin yüzey yapısı ve üretim tekniği
- Braketin slot çapı
- Braketin angulasyonu ve torku

#### Ligasyona Bağlı Faktörler

- Ligatür materyali
- Ligatür bağlama tekniği

### 2.2.2. Biyolojik Faktörler

- Tükürüğün etkisi
- Artık birikiminin etkisi

- Oral Fonksiyonların etkisi
- Korozyon

## 2.2.1. Fiziksel Faktörler

### 2.2.1.1. Ark Teliyle İlgili Faktörler

#### Ark Telinin Materyali

Günümüzde ortodontik ark telleri pek çok farklı materyalden üretilmektedir. Bunlardan en sık kullanılanları paslanmaz çelik teller, nikel titanyum teller ve beta titanyum tellerdir. Krom kobalt, altın, kompozit, fiber optik plastik teller gibi rutin uygulamalarda kullanılmayan ark telleri de mevcuttur.

Birinci Dünya Savaşı'nda paslanmaz çeliğin ortaya çıkması ve 1930'ların sonunda ark formlu teller oluşturmak için çizim işlemlerinin iyileştirilmesiyle, altın teller, paslanmaz çelik tellerin sağlayabileceği özelliklere karşı popülaritesini kaybetmiştir(R. P. Kusy, 1997). Bu tellerin içeriği; %17-19 veya %18-20 krom, %8-10 veya %8-12 nikel, %0,2 karbon, %70-75 demir ve az oranlarda diğer elementlerden oluşur. Krom paslanmazlık ve sağlamlığı, nikel stabiliteyi, karbon ise sertliği ve korozyona dayanıklılığı sağlar(R. P. Kusy, 1988). Paslanmaz çelik teller, yüksek dayanıklılık, yüksek katılık, düşük çalışma aralığı ve düşük geri yaylanma özelliğine sahiptirler(R. P. Kusy, 1988; Proffit, 2013).

Nikel titanyum alaşımları ilk olarak 1963 yılında Buehler tarafından geliştirilmiş ve 1970'li yılların başında Andreasen tarafından ilk defa ortodontik alanda kullanılmıştır (Andreasen ve Morrow, 1978; Buehler ve ark., 1963). Günümüzde bu teller; akıllı teller, şekil hafızalı teller, süperelastik teller gibi farklı isimlerle adlandırılmaktadır. Nikel titanyum telleri paslanmaz çelik tellerden ayıran özellikleri; yüksek elastikiyet, şekil hafızalı olması ve plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. %55 nikel ve %45 titanyum içeren şekil hafızalı alaşım genellikle nitinol olarak adlandırılır(Liu ve ark.,

2004). Bu tellerin esneklik modülü paslanmaz çelik tellerin %26'sı kadardır. NiTi teller hiçbir plastik deformasyon göstermeksizin paslanmaz çelik tellerin iki katı kadar esneme gösterebilirler(Graber ve ark., 2005). Bu özellikleri nedeniyle ni-ti teller başlangıç seviyelemede kullanılabilir ideal tellerdir. Ni-ti teller martensit ve ostenit olmak üzere iki ayrı kristal yapıda bulunurlar.

Beta titanyum teller ilk olarak 1980 yılında Burstone ve Goldberg tarafından tanıtılmışlardır(Burstone ve Goldberg, 1980). Bu teller elastikiyet özellikleri itibariyle paslanmaz çelik ile nikel titanyum teller arasında yer almaktadır. Elastikiyet bakımından nikel titanyum tellere yakın olmasına rağmen iyi bir şekil verilebilme özelliğine sahiptir(Tosun, 1999). Bu tellerin elastiklik modülü niti tellerin yaklaşık olarak iki katı, paslanmaz çelik tellerin ise üçte biri kadardır(Burstone ve Goldberg, 1980). Bu özellikleri nedeniyle hafif ve uzun süreli kuvvet uygulamaları ve klinikte sıklıkla tercih edilen tellerdir. Yapılan pek çok çalışmada TMA tellerin paslanmaz çelik ve nikel titanyum tellerden daha fazla pürüzlülüğe ve çok daha yüksek sürtünme değerlerine sahip olduğu gösterilmiştir(Angolkar ve ark., 1990; Bazakidou ve ark., 1997).

Yapılan pek çok çalışmada paslanmaz çelik tellerin nikel titanyum ve beta titanyum tellerden daha düşük sürtünme kuvveti oluşturduğu gösterilmiştir ve bu durum paslanmaz çelik tellerin daha pürüzsüz olmasına bağlanmıştır(Drescher ve ark., 1989; Garner ve ark., 1986; Kapila ve ark., 1990; R. P. Kusy ve ark., 1991; Pratten ve ark., 1990). Nikel titanyum ve beta titanyum tellerin karşılaştırıldığı çalışmalarda ise farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Kusy ve Whitley 1988 yılında yaptıkları çalışmalarında dört farklı ark teli alaşımı ile çelik plaklara karşı sürtünme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Buna göre en düşük sürtünme katsayısını paslanmaz çelik göstermiştir. Beta titanyum ise en yüksek ve değişken sürtünme katsayısı değerlerini göstermiştir. Nikel titanyum ve krom kobalt için sürtünme katsayısı değeri ikisinin arasında bulunmuştur(R. Kusy ve Whitley, 1989).

Kusy ve Whitley 1990 yılında yaptıkları çalışmalarında ark teli-braket kombinasyonu için sürtünme katsayılarını ve yüzey pürüzlülüklerini incelemişlerdir. Paslanmaz çeliğin, krom kobaltın, beta-titanyumun ve nikel-titanyumun ortalama olarak pürüzlülük değerleri sırasıyla 0.053, 0.129, 0.137 ve 0.247  $\mu\text{m}$ 'dir. Ark teli-braket kombinasyonları atmosfer şartları altında 34° de incelenmiş ve braketler 0.010 inç paslanmaz çelik ligatür ile bağlandığında sürtünme katsayısı değerleri braket tipi ve slot genişliğinden bağımsız olarak en düşük paslanmaz çelik, sonra krom kobalt, ardından nikel-titanyum ve en yüksek beta-titanyum tellerde elde edilmiştir(R. Kusy ve J. Whitley, Q, 1990).

Bazakidou ve arkadaşlarının 1997'de yapmış oldukları çalışmada en az sürtünme paslanmaz çelik tellerde sağlanırken bunu sırasıyla beta titanyum ve nikel titanyum teller takip etmiştir(Bazakidou ve ark., 1997).

Cacciafesta ve arkadaşları 2003 yılında yaptıkları çalışmalarında üç farklı ark teli alaşımı; paslanmaz çelik, nikel-titanyum ve beta-titanyumun oluşturdukları sürtünme direnci seviyeleri bakımından karşılaştırmışlardır. Beta-titanyum ark tellerinin paslanmaz çelik ve nikel-titanyum ark tellerinden daha fazla sürtünme direncine sahip olduğu, paslanmaz çelik ve nikel-titanyum ark telleri arasında ise anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür(Cacciafesta, Sfondrini, Scribante, ve ark., 2003).

Doshi ve Patil'in 2011 yılında yaptıkları çalışmada en az sürtünme paslanmaz çelik telde oluşurken bunu nikel titanyum teller izlemiş ve en fazla sürtünme beta titanyum ark telleriyle oluşmuştur(Doshi ve Bhad-Patil, 2011).

### **Ark Telinin Çapı ve Kesiti**

Ortodontik tedavi süresince farklı boyutlarda ark telleri kullanılmaktadır. Yuvarlak ve köşeli olmak üzere iki farklı kesitte ark teli çeşidi mevcuttur. Tedavi başlangıcında daha küçük çaplı ve ince teller kullanılırken tedavi ilerledikçe daha kalın teller kullanılmaya başlanır.

Yapılan pek çok çalışmada ark tellerinin çapı arttıkça sürtünme kuvvetinin arttığı ve köşeli ark tellerinin de yuvarlak ark tellerinden daha fazla sürtünme kuvveti oluşturduğu gösterilmiştir(Angolkar ve ark., 1990; Bednar ve ark., 1991; Cacciafesta, Sfondrini, Scribante, ve ark., 2003; Chen ve ark., 2019; Frank ve Nikolai, 1980). Bunun sebebi olarak, ark teli kalınlaştıkça braket slotuna daha iyi oturması ve temas yüzeylerinin artmış olması gösterilmektedir. Yuvarlak ark telleri braket slotuyla nokta teması sağlarken köşeli ark telleri yüzey teması sağlamaktadır ve bu durum köşeli ark tellerinin sürtünmesinin fazla olma sebebini açıklamaktadır(Frank ve Nikolai, 1980).

### **Ark Telinin yüzey yapısı ve sertliği**

Yüzey yapısı triboloji biliminde önemli etkenlerden birisidir. Madde yüzeyinin pürüzlülük derecesi sürtünme kuvvetini de etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü ile sürtünme kuvvetinin doğru orantılı olarak değiştiği yapılan pek çok çalışmada gösterilmiştir. Kusy 1988'de yaptığı çalışmada en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olarak paslanmaz çelik telleri bulmuş bunu sırasıyla kobalt-krom, beta-titanyum ve nikel titanyum ark telleri izlemiştir. Sürtünme kuvveti ise en az paslanmaz çelik tellerde ölçülmüş bunu sırasıyla kobalt-krom, ni-ti ve beta-titanyum teller izlemiştir. En yüksek pürüzlülük değeri nikel titanyum tellerde bulunmasına rağmen sürtünme kuvveti en fazla beta titanyum tellerde bulunmuştur(R. P. Kusy, 1988). Yine Drescher ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Kusy'nin çalışmasıyla benzer sonuçlar bulunmuştur(Drescher ve ark., 1989).

Bourauel ve arkadaşları 1998 yılında yaptıkları çalışmalarında nikel-titanyum, paslanmaz çelik ve beta-titanyum ark telinin yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmişlerdir. En pürüzsüz ark telinin paslanmaz çelik olduğu belirtilmiş ve sırasıyla telin optik pürüzlülüğü 0.10  $\mu\text{m}$ , AFM ile 0.09  $\mu\text{m}$  ve profilometre ile 0.06  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Her üç yöntemle beta-titanyum için yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 0.21  $\mu\text{m}$  ve nikel-titanyum için 0.10 ile 1.30  $\mu\text{m}$  arasında değerler olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün kayma mekaniklerini ve sürtünme değerlerini etkilediği gibi korozyon özelliğini de etkilediğini belirtmişlerdir(Bourauel ve ark., 1998).

Fakat bu görüşlerden farklı olarak yüzey pürüzlülüğü ile sürtünme arasında ilişki olmadığını savunan araştırmalar da vardır(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1990; Prososki

ve ark., 1991). Kusy ve Whitley beta-titanyum tellerin nikel-titanyum tellerden daha pürüzsüz olduğunu ancak sürtünme katsayısının daha yüksek olduğunu tespit etmiştir(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1990).

Ark tellerinin klinik kullanımlarından sonra pürüzlülüğünü inceleyen bir çalışmada 0,019x0,025 inç paslanmaz çelik ark telleri ağızda 8 hafta tutulmuş ve bunun sonucunda yüzey pürüzlülüğünde artış ve buna bağlı olarak sürtünmede de artış görülmüştür(Marques ve ark., 2010). Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve buna yönelik yüzey işleme teknikleri ortodontide bu noktada büyük önem kazanmaktadır.

Choi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 0,016 niti ve 0,019x0,025 ss teller ağız içinde 4 ay tutulmuş ve daha sonra yüzey pürüzlülükleri ve çeşitli braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü azaldıkça sürtünme kuvvetlerinin de bununla paralel olarak azaldığını tespit etmişlerdir(Choi ve ark., 2015).

Sertlik, bir malzemenin plastik deformasyona karşı olan direncidir. Bir malzemenin sertliği arttıkça, mukavemeti de artar(Callister, 1994). Yapılan çalışmalarda paslanmaz çeliğin nikel titanyum ve beta titanyumdan daha sert olduğu gösterilmiştir(Saunders ve Kusy, 1994). Kusy ve Whitley en uygun sürtünme değerleri için hem braketin hem de ark telinin sert olması gerektiğini fakat birinin diğerinden azda olsa daha yumuşak olması gerektiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada daha yumuşak braket malzemelerinin ve daha sert ark teli alaşımlarının kombinasyonun daha düşük sürtünme değerleri verdiği söylenmiştir. Ark telinin sert olması gereklidir çünkü telin sertliğinin azalmasıyla birlikte tel daha fazla defleksiyona uğramakta ve braket slotuyla yaptığı açının artması sonucu sürtünme değerleri de artmaktadır(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997). Ho ve West, ark teli sertliğinin sürtünme direncinde, yüzey pürüzlülüğünden daha fazla kontrol edici bir faktör olabileceğini öne sürmüştür(Ho ve West, 1991).



### **2.2.1.2. Braket ile İlgili Faktörler**

#### **Braket Materyali**

Braketler sabit ortodontik tedavinin en önemli unsurlarındandır ve kuvveti diş ileten elemanlardır. Braketler günümüzde farklı materyallerden üretilmektedir. Bu materyaller; paslanmaz çelik, seramik, kompozit, titanyum ve plastiktir.

Günümüzde en sık kullanılan braketler paslanmaz çelik braketlerdir. Dayanıklı, ucuz ve hijyenik olmaları en sık tercih edilen braketler olmalarını açıklamaktadır. Estetik olmamaları ve nikel açığa çıkarmaları ise dezavantajları arasında sayılabilir(Tosun, 1999). Yüzey yapılarının pürüzsüz olması, iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olmaları nedeniyle pek çok çalışmada en iyi sürtünme özelliklerine sahip braketler olarak gösterilmişlerdir(Angolkar ve ark., 1990; Bednar ve ark., 1991; De Franco ve ark., 1995; Loftus ve ark., 1999).

Kusy ve Whitley 1990'da yaptıkları bir çalışmada en düşük pürüzlülük ve sürtünmeyi paslanmaz çelik teller ve paslanmaz çelik braketlerin kombinasyonundan elde etmişlerdir(R. Kusy ve J. Whitley, Q, 1990).

Articolo ve arkadaşlarının 1999'da yaptığı çalışmada pasif konfigürasyonda paslanmaz çelik braketlerin seramik braketlerden daha az sürtünmeye sahip olduğunu fakat aktif konfigürasyonda kaymaya karşı direncin sürtünmeye ek olarak kilitlenme(binding) faktöründen de kaynaklandığını ve bu durumda paslanmaz çelik braketlerin seramik braketlerden daha az efektif olduğunu bulmuşlardır(Articolo ve Kusy, 1999).

Seramik braketler, estetik ve zamanla değişmeyen şeffaflık, yüksek dayanıklılık, deformasyon ve aşınma direnci gibi avantajlara sahip braketlerdir(Russell, 2005). Monokristalin alumina, polikristalin alümina ve polikristalin zirkonya olmak üzere 3 çeşidi mevcuttur. Monokristalin alümina braketler, polikristalin alümina braketlerden daha sert olup, daha yüksek gerilme direncine sahiptirler ve yüzeyleri daha pürüzsüz ve görünümleri daha şeffaftır(Saunders ve Kusy, 1994; Tosun, 1999). Polikristalin zirkonya braketler ise tüm seramikler içinde en sert yapıya sahip olup, polikristalin alümina braketlere oranla daha pürüzsüz ancak daha opaktır(Keith ve ark., 1994).

Seramikler metallere daha sert ve katı malzemelerdir fakat kırılabilirlikleri de daha fazladır(Callister, 1994). Daha önceki çalışmalar, seramik braketlerin paslanmaz çelik braketlerden daha yüksek sürtünme katsayıları ve direncine sahip olduğunu ve bu farklılığın seramik braketin yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek olmasıyla ilişkili olabileceğini göstermiştir(Angolkar ve ark., 1990; R. P. Kusy ve ark., 1991). Taramalı elektron mikroskobu altında, seramik braketlerin, çok sayıda gözenek içeren kristalimsi bir yapı sergilediği, paslanmaz çelik braketlerin slot yüzeylerinin ise çok az düzensizliğe sahip olup çok daha pürüzsüz oldukları gözlenmiştir(Pratten ve ark., 1990; Tanne ve ark., 1994).

Yine yapılan başka bir çalışmada en yüksek sürtünme gösteren braket polikristalin alümina braketler olmuş bunu sırasıyla monokristalin alümina ve paslanmaz çelik braketler takip etmiştir(Arash ve ark., 2015).

Sürtünme kuvvetini azaltmak için seramik yapıdaki braket slotlarını, paslanmaz çelik alaşımla güçlendirip metal slotlu seramik braketler üretilmiştir(Kapila ve ark., 1990; R. P. Kusy ve Whitley, 2001). Cacciafesta ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, konvansiyonel metal (Victory Series, 3M Unitek) ve seramik (Transcend Series 6000, 3M Unitek, Monrovia, Calif) braket ile metal slotlu seramik (Clarity, 3M Unitek) braketleri karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre metal slotlu seramik braketlerin konvansiyonel seramik braketlerden anlamlı derecede düşük sürtünme kuvveti meydana getirdiklerini tespit etmişlerdir. Buna rağmen oluşan sürtünme kuvveti, konvansiyonel metal braketlerde elde edilen sonuçlardan daha yüksek olmuştur(Cacciafesta, Sfondrini, Ricciardi, ve ark., 2003). Nishio ve arkadaşları da, 2004 yılında yaptıkları çalışmada bu üç tip braketleri karşılaştırmış, sürtünme kuvveti değerlerinde Cacciafesta ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlara benzer sonuçlar bulmuşlardır(Nishio ve ark., 2004).

Arıcı ve ark.'nın, Clarity, Pure, Transcend ve Gemini braketleri karşılaştırdıkları çalışmalarında bulunan sonuçlar da önceki çalışmalarını destekler nitelikte olmuştur(Arici ve ark., 2015).

Bu çalışmalardan farklı sonuçlar bulunan çalışmalar da olmuştur. Kusy ve Whitley yaptıkları bir çalışmada polikristalin alümina ve paslanmaz çelik braketleri

karşılaştırmışlar ve braket materyalinin sürtünme üzerinde anlamlı etkisi olmadığını bulmuşlardır(R. Kusy ve J. Whitley, Q, 1990).

Yine Keith ve arkadaşlarının, 1994 yılında yaptıkları çalışmada, braket materyalinin ark teli materyali ile kıyaslandığında sürtünme direncini etkileme açısından önemsiz olduğu bulunmuştur(Keith ve ark., 1994).

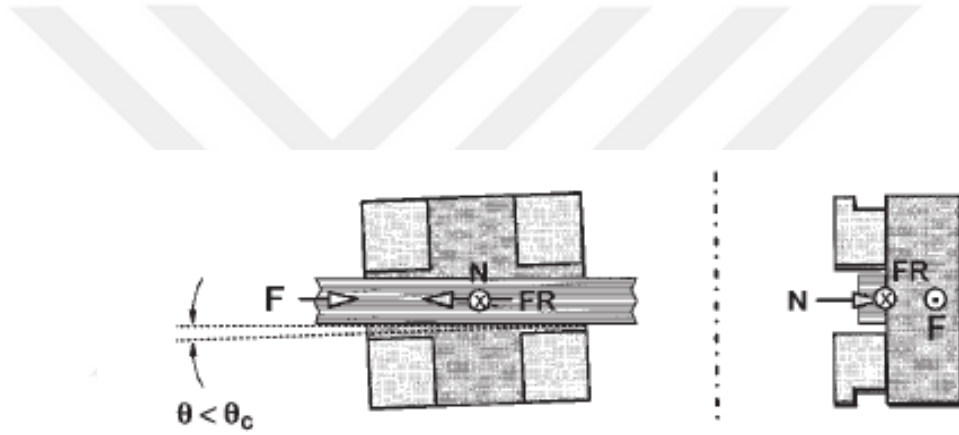
Saunders ve Kusy, seramik braketleri taramalı elektron mikroskobu altında incelemişler ve monokristalin alümina braketlerin polikristalin braketlere göre daha pürüzsüz olduğunu ancak bu durumun sürtünme özellikleri açısından fark oluşturmadığını göstermişlerdir(Saunders ve Kusy, 1994).

Kompozit braketler, 1970'lerde erişkin hastaların sayısındaki artışla beraber, metal braketlerin estetik olmayan görüntüsüne alternatif oluşturmak amacıyla üretilmiştir. İlk kez akrilik materyalden üretilen bu braketler, daha sonra aromatik bir polimer olan polikarbonattan üretilmiştir(Cacciafesta ve ark., 2003). Dayanıklılık, boyutsal stabilite ve bükülmeye direnç özelliklerinin oldukça zayıf olduğu, özellikle tork kuvvetleri altında kolayca plastik deformasyona uğrayarak kuvveti dişlere iletmekte yetersiz kaldıkları bildirilmiştir(Ghafari, 1992). Karşılaşılan diğer bir problem ise kompozit braket ile ark teli arasındaki sürtünme kuvvetinin oldukça yüksek bulunmuş olmasıdır (Russell, 2005). Meydana gelen yüksek sürtünmeyi azaltmak amacıyla ise braket slotları metal ya da seramikle kaplanmış kompozit braketler ortodonti pratiğinde kullanıma sunulmuştur(Graber ve ark., 2005; Kapila ve ark., 1990).

Titanyum, biyouyumlu ve korozyona karşı dirençli bir materyaldir Titanyum braketler, paslanmaz çelik braketlere alternatif olarak kullanılacak diğer bir metal braket türüdür(Graber ve Swain, 1985). Titanyum braketlerin Kusy ve arkadaşları tarafından değerlendirildiği çalışmada bu braketlerin daha pürüzlü bir yüzey yapısı göstermelerine rağmen pasif konfigürasyonda paslanmaz çelik braketlere benzer sürtünme katsayılarına sahip olduğu bulunmuş ve sürtünmenin yüzey materyallerinin kimyasal yapısı ile ilgili olabileceği öne sürülmüştür(R. Kusy ve ark., 1998).

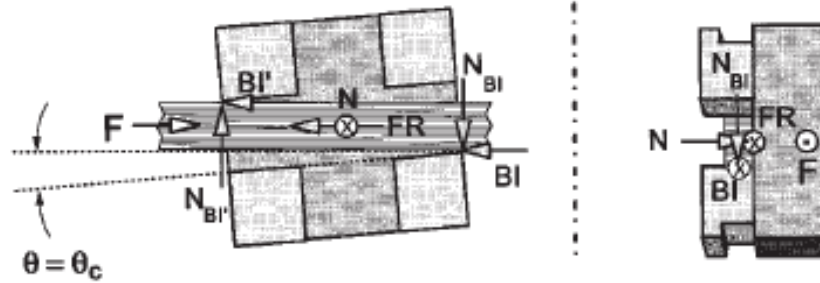
### Braket Açılanması

Sürtünmeye karşı oluşan direncin (RS) pasif konfigürasyondaki tek unsuru daha önce de bahsedildiği gibi klasik sürtünmedir ( $FR = \mu N$ ). FR, kayma hareketi sırasında tel ve braket duvarları arasındaki temasın sonucu olarak ortaya çıkar. Pasif konfigürasyonda braket ile tel arasında oluşan açı ( $\theta$ ) kritik kontakt açısından ( $\theta_c$ ) küçüktür. (Şekil 2.3.) N değeri yüzeye dik etki eden kuvvet olup ligatürleme kuvvetini (N) temsil eder. Yüzeyleri çok pürüzlü olan cisimlerde yüzeydeki girinti ve çıkıntılar arttıkça sürtünme kuvveti de artmaktadır (R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997).



**Şekil 2.3.** Kritik kontakt açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve pasif konfigürasyonda  $\theta < \theta_c$  'dir. Bu durumda  $RS=FR$  (Articolo ve Kusy, 1999)

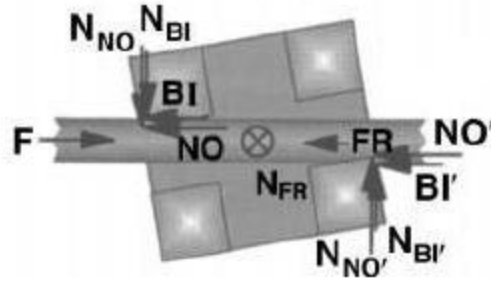
Aktif konfigürasyonda ise slot ile tel arasında açılanma meydana gelir ve tel slot köşelerine temas eder yani  $\theta = \theta_c$  dir. (Şekil 2.4.) Ark teli ile braket oluğu arasındaki açı kritik kontakt açısına eşit veya büyük olduğu durumda ( $\theta \geq \theta_c$ ) ark telinin braket oluğu ile temasta olduğu kenarlarda kilitleme (BI) meydana gelir. Bu safhada, sürtünmeye karşı oluşan direnç klasik sürtünme (FR) ve kilitlemeden (BI) dolayı oluşur (R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997). FR; klasik sürtünmeyi, BI; kilitlemeyi temsil etmektedir. (Şekil 2.4)



**Şekil 2.4.** Kritik kontak açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve aktif konfigürasyonda  $\theta=\theta_c$  'dir. Bu durumda  $RS=FR+BI$  (Articolo ve Kusy, 1999)

Bu durumdan itibaren tele braket oluşunun mezial kenarında aşağı yönlü, distal kenarı ise yukarı yönlü bir kuvvet çifti etki eder. Bu kuvvet çifti karşısında esneyen tel ise braket oluşuna eşit şiddette ters yönlü bir kuvvet çifti uygular. Sürekli kuvvetin etkisi ile diş devrilmeye devam eder. Ancak, kritik kontak açısı aşıldığından tel ile braket arasındaki sürtünme kuvvetinin miktarı hızla artar ve dişin hareketini durduracak düzeye ulaşır. Bu andan itibaren esneyen ark telinin meydana getirdiği kuvvet çiftinin etkisi ile diş dikleşir ve sürtünme kuvvetinin azalması ile hareket yeniden başlar(Tosun, 1999).

Ark telinde meydana gelen kuvvet çifti dişi dikleştirmeye yetecek miktara ulaşmadığı durumlarda ise uygulanan sürekli kuvvetin etkisi ile diş daha fazla devrilmektedir. Ark teli ile braket oluşu arasında oluşan açı artmaya çalıştıkça kaymaya karşı dirençte üçüncü bir fenomen olan çentiklenme (NO) devreye girer ve kayma hareketi neredeyse durma noktasına gelir(R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1997; R. P. Kusy ve Whitley, 1999). (Şekil 2.5) Ark teli üzerinde oluşan bu çentikler (NO), gözlemlenen mekanik hasarlardır ve kilitleme safhasından sonra meydana gelmektedir(Articolo ve ark., 2000; R. P. Kusy ve Whitley, 1999).



**Şekil 2.5.** Kritik kontakt açısı( $\theta_c$ ) telin braket slot köşelerine temas ettiği durumda oluşan açıdır ve aktif konfigürasyonda bu açının artması durumunda  $RS=FR+BI+NO$

Bu bilgiler ışığında angulasyonun sürtünmenin oluşmasında önemli bir role sahip olduğu açıkça görülmektedir. Angulasyon arttıkça ark teli ve braket arasındaki temas kuvveti artar ve bu da sürtünmeyi artırır. Araştırmaların büyük çoğunluğu da ark teli ile braket slotu arasında oluşan açılanmanın sürtünmeyi arttırıcı bir faktör olduğu konusunda hemfikirdir(Frank ve Nikolai, 1980; B.-S. Kang ve ark., 2003; R. P. Kusy ve Whitley, 1999; Schlegel, 1996; Thorstenson ve Kusy, 2001). Braket ve ark teli arasındaki ikinci ve üçüncü düzen açılanmaların sürtünmeye etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, her iki düzende de açılanma artışıyla birlikte sürtünme kuvvetinin arttığı bulunmuştur(Moore ve ark., 2004; Pizzoni ve ark., 1998; Read-Ward ve ark., 1997; Meir Redlich ve ark., 2003; Thorstenson ve Kusy, 2001).

### **Braketin Genişliği**

Yapılan çalışmalarda braket genişliğinin sürtünme üzerindeki etkisiyle ilgili olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Daha geniş braketlerin daha az sürtünme kuvveti oluşturacağını söyleyen pek çok araştırmacı olmuştur(Drescher ve ark., 1989; Omana, 1992; Tidy ve Orth, 1989). Bu düşüncenin tam tersi olarak daha dar braketlerin daha az sürtünme kuvveti oluşturacağını iddia eden araştırmacılar da vardır(Frank ve Nikolai, 1980; Kapila ve ark., 1990; Schudy ve Schudy, 1989). Elde edilen sonuçlardaki farklılığın temel sebebi, yapılan laboratuvar çalışmalarında gerçek ortamın yeterince yansıtılmaması ve standardizasyonun sağlanamamasıdır.

Kapila ve arkadaşları, geniş braketlerde daha fazla sürtünme kuvvetleri oluştuğunu söylemişler ve bu durumu ligatürün geniş braketler üzerinde daha fazla gerilmesine ve sonuçta daha fazla kuvvet oluşturmaya bağlamışlardır(Kapila ve ark., 1990).

Frank ve Nikolai, daha geniş braketlerde daha fazla sürtünme oluşmasının sebebinin, geniş braketlerin temas yüzey alanlarının da fazla olması sonucu ark telinin daha büyük bir yüzeye temasta olmasından kaynaklandığını düşünmüştür(Frank ve Nikolai, 1980).

Schlegel, braketin geniş veya dar olmasının sürtünmeyi azaltmadaki etkisinin sadece braketin genişliği ile cevaplanamayacağını belirtmiş ve bununla beraber, olay üç boyutta incelendiğinde, düzlemsel temasların olmaması, telin esnekliği ve diğer birçok faktörün de sürtünme üzerine etkisi göz önünde bulundurulduğunda, bu konuda kesin bir yargıya varmanın zor olacağını belirtmiştir(Schlegel, 1996).

### **Braketin Yüzey Yapısı ve Üretim Tekniği**

Braketlerin yüzey özellikleri meydana getirdikleri sürtünme kuvvetleri açısından önemlidir. Bu konudaki farklılıkların en önemli sebebi çok değişik şekillerde üretilibilmeleridir. Üretimde kullanılan malzemenin, üretim şeklinin ve yüzey bitirme işlemlerinin sonucu olarak farklı yüzeyler oluşmaktadır(Proffit, 2013).

Braketler, şekillendirme işleminden hemen sonra, yüzeyinde kalan çapakları temizlemek için bir kesme işleme tabi tutulur. Bu işlem için elmas, ultrasonik veya lazer kesiciler kullanılmaktadır. Ayrıca hemen hepsi temel bir parlatma işleme tabi tutulmaktadır. Parlatma, mekanik olabileceği gibi elektrokimyasal olarak da uygulanabilir. Bazı braketlere ise bu aşamada sürtünmeyi ve korozyonu azaltıcı kaplamalar uygulanmaktadır. Bu amaçla en yaygın kullanılan kaplama yöntemleri; iyon implantasyonu, elmas benzeri karbon kaplamalar ve plazma kaplamalardır. Bu kaplama yöntemlerinin her birinin kendi yüzey ve sürtünme karakterleri olduğu gibi özellikle plazma kaplamalarda kullanılan hedef malzemeye göre ve hatta kaplama yöntemleri sırasında kullanılan sıcaklık, basınç gibi kaplama şartlarına göre de yüzey özellikleri

değişebilmektedir. Ortodontik malzemelerin kaplanması çok geniş ve malzeme biliminin de gelişmesine paralel olarak giderek popülerlik kazanan bir alandır ve başlı başına bir araştırma konusudur(Kobayashi ve ark., 2005; R. Kusy ve ark., 1992).

1995 yılında Vaughan ve ark. yaptıkları bir çalışmada sinterleme tekniğiyle üretilmiş olan iki çeşit paslanmaz çelik braketin sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Elde edilen bulgular Kapila ve ark. tarafından 1990 yılında yapılan başka bir sürtünme çalışmasıyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Karşılaştırma sonucunda, sinterleme tekniğiyle üretilen braketlerin döküm tekniğiyle üretilen braketlerden daha düşük sürtünme kuvvetleri oluşturduğu ortaya koyulmuştur. Araştırmacılar iki ayrı teknikte üretilen braketlerin farklı sürtünme özellikleri göstermesini yüzey topografilerinin farklı özellikler göstermesiyle ilişkilendirmişlerdir(Vaughan ve ark., 1995). Omana ve ark. tarafından 1992 yılında yapılan bir çalışmada ise enjeksiyon kalıplama tekniğiyle üretilen seramik braketlerin sinterleme tekniğiyle üretilenlerden daha düşük sürtünme direncine sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

### **Braket Dizaynı ve Slot Çapı**

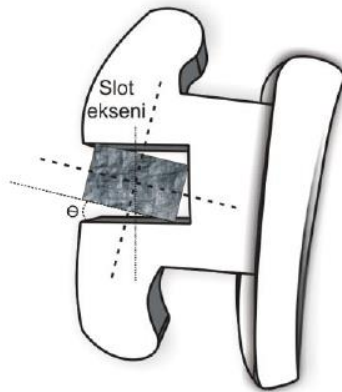
Ortodontik braket tasarımındaki temel faktör slot yapısının ligatür ile ark telini bağlamaya uygun olması ve dişin istenilen doğrultuda hareketinin kontrol edilebilmesidir. Bununla birlikte, standart bir braket tasarımı yoktur, ancak sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olmak için bazı tasarımlar geliştirilmiştir. Ogata ve arkadaşları, ligatürün tel üzerinde oluşturduğu bağlanma kuvvetini sınırlayan braket tasarımlarının daha düşük sürtünme kuvvetleri ürettiğini bulmuşlardır(Ogata ve ark., 1996). Buna örnek olarak farklı braket tasarımlarından birine sahip olan Synergy (RMO, Denver) braketleri verilebilir. Farklı ligasyonlara uygun olabilmesi için altı adet braket kulakçığına sahiptir ve sadece merkez kanatların bağlanması, tel üzerindeki bağlanma kuvvetini sınırlar. Bu nedenle normal kuvvet belirgin şekilde azaltılabilir.

Ligasyon yöntemlerinin oluşturduğu sürtünmeyi kontrol altına almak için kendinden bağlanan braketler üretilmiştir ve son dönemlerde popülerlik kazanmışlardır. Kendinden bağlanan braketler, üzerlerinde bulunan mekanik bir aygıtla braket yatağının kapatılmasını sağlayan ligatürsüz sistemlerdir. Konvansiyonel braket sistemleriyle karşılaştırıldığında kendinden bağlanan braket sistemlerinde, ark telinin braket oluşuna



serbestçe yerleştiği ve hareket edebildiği gözlemlenmiş, bunun sonucunda çok düşük sürtünme değerleri ve nispeten daha hafif kuvvetlerin uygulanmasının mümkün olabileceği belirtilmiştir(Cacciafesta, Sfondrini, Ricciardi, ve ark., 2003; Pizzoni ve ark., 1998; Woodside ve ark., 2005). Buna rağmen konvansiyonel ve kendinden bağlanan braket tipleri arasında oluşturdukları sürtünme kuvveti açısından anlamlı bir fark olmadığını savunan çalışmalar da mevcuttur(Bednar ve ark., 1991; Loftus ve ark., 1999). Kendinden bağlanan braket sistemleri bu avantajlara sahip olmasına rağmen en büyük dezavantajları pahalı olmalarıdır.

Ortodontide en yaygın kullanılan standart slot genişlikleri 0,018 inç ve 0,022 inçtir. Slot çapı değiştiğinde sistemdeki sürtünme kuvveti de değişmektedir. Bunun sebebi aynı kalınlıkta telin daha dar slota sahip braketle slot duvarlarına daha fazla temas etme ihtimalidir. Bu nedenle farklı slot çapına sahip braketlerde, istenen diş hareketleri için kullanılan teller de farklıdır (Peck, 2001). Braket slotunu tam dolduran teller braketle tel arasında boşluk kalmamasına sebep olacak, sürtünmeyi artırarak diş hareketini engelleyecek ve aşırı kuvvetler sonucu diş üzerinde yıkıcı etkiler oluşturacaktır(Articolo ve Kusy, 1999). Bu sebeple genellikle 0,018 inç slota sahip braketlerde 0,017x0,025 inç teller tercih edilirken 0,022 inç slota sahip braketlerde 0,019x0,025 inç teller tercih edilmektedir. Bu teller brakete hareket imkânı tanıyarak yeterli miktarda kuvvet uygulayacak kadar kalın tellerdir(Peck, 2001; Peterson, 1982).



**Şekil 2.6.** 0,022 inç slot genişliğine sahip bir braket slotu ile bitim aşamasında kullanılan 0,019x0,025 inç tel arasında kalan boşluk sebebiyle ark teli braketin içinde belli bir açığa kadar (θ) hareket edebilmekte, bu, sürtünmeyi azaltırken, fazladan tork kuvveti uygulanması ihtiyacı doğurabilmektedir.

Yapılan birçok çalışmaya göre, diş hareketi ortodontik biyomekaniğin kurallarına uyularak uygulandığında, slot genişliğinin sürtünme üzerine etkisi çok azdır(Angolkar ve ark., 1990; Tidy ve Orth, 1989). Kang ve arkadaşları ile Schlegel'in yaptıkları çalışmalarda slot genişliği, derinliği, boyu ve tel ile arasında oluşan kritik kontak açıları üzerine geliştirdikleri matematiksel formüllerde, slot genişliğinin sürtünme üzerine çok küçük etkileri olduğu görülmüştür(B.-S. Kang ve ark., 2003; Schlegel, 1996). Bunlardan farklı sonuçların elde edildiği başka çalışmalar da yapılmıştır. Kapila ve arkadaşları 1990 yılında yaptıkları çalışmada, 0.018 inç ve 0.022 inç slota sahip paslanmaz çelik braketlerde paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel titanyum ve beta titanyum teller kullanıldığındaki sürtünme değerlerini kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda aynı ark teli boyutlarında 0.022 inç slota sahip braketlerin daha düşük sürtünme kuvvetleri ortaya çıkardığını tespit etmişlerdir(Kapila ve ark., 1990). Andreasen ve Quevedo tarafından yapılan araştırmada, 0.022 inç slota sahip braketlerin sürtünme dirençlerinin 0.018 inç braketlere göre daha az olduğu bunun muhtemel sebebinin de kullanılan tel sertliğinin artmasına bağlı olarak, slot köşelerinde oluşan kilitlenmenin (binding) azalması olduğu söylenmiştir(Andreasen ve Quevedo, 1970). Arici ve arkadaşlarının 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, 0.018 inç ve 0.022 inç slot braketler kullanılmış, braketin slot genişliği arttıkça sürtünme kuvvetinin azaldığı bulunmuştur(Arici ve ark., 2015).

### ***2.2.1.3. Ligasyona Bağlı Faktörler***

#### **Ligatür Materyali ve Bağlama Teknikleri**

Ligatürler ortodontide ark telini brakete bağlamak için kullanılan materyallerdir. Paslanmaz çelik ligatürler, konvansiyonel elastomerik ligatürler, konvansiyonel olmayan elastomerik ligatürler, estetik amaçla kullanılan teflon kaplı ligatürler ortodontide ligasyon amaçlı kullanılan teknik elemanlardır. Paslanmaz çelik ligatürler genellikle 0.009 inç, 0.010 inç ve 0.012 inç boyutlarında olup, dayanıklı, hijyenik, ucuz materyallerdir. Dezavantajı olan zaman kaybını önlemek için önceden hazırlanmış tipleri de mevcuttur. Elastomerik ligatürler poliüretandan üretilir ve hasta için konforlu,

hekim için kolay ve hızlı uygulanabilen materyallerdir. Piyasada farklı renk seçenekleriyle bulunmaktadır. En önemli dezavantajı kalıcı deformasyona uğramaları(Wong, 1976) ve poliüretan polimerlerin yavaş hidrolize olması sonucu, nemli ortamlarda bozulmalarıdır(Young ve SANDRIK, 1979). Mikrobiyal birikintileri tutmaya eğilimlidirler(Forsberg ve ark., 1991). Uyguladıkları kuvvet, 3 ila 4 haftalık zaman sonunda giderek azalmaktadır(Taylor ve Ison, 1996). Diğer bir sorun ise tork ve rotasyon hareketlerinde, ark telinin braket slotuna tam olarak oturmaması nedeniyle, istenen düzeltmeleri sağlayamamalarıdır(Echols, 1975). Konvansiyonel olmayan elastik ligatürler ise sürtünmeyi azaltma amaçlı olarak tasarımı değiştirilmiş elastomerik ligatürlerdir. Tasarımları gereği teli braket yüzeyine mümkün olduğunca az temas ile bağlarlar(Fortini ve ark., 2005). Bu özellikleriyle pasif kendinden bağlanan braketlere alternatif olarak gösterilmişlerdir(Baccetti ve Franchi, 2006).

Teflon kaplı ligatürler, estetik olmaları nedeniyle estetik braket sistemlerinde tercih edilmektedir. Teflonun yüzey özelliklerinden dolayı elastomerik ligatürler ile karşılaştırılan çalışmalarda, daha düşük sürtünme değerleri verdiği bulunmuştur(De Franco ve ark., 1995).

Ark telini braket slotuna yaklaştırmak için kullanılan ligatürler uyguladıkları kuvvet ile iki yüzeyi birbirine doğru bastırarak sürtünmeyi arttırmaktadır. Yani bağlama kuvveti arttıkça sürtünme kuvveti de artmaktadır(Frank ve Nikolai, 1980; Keith ve ark., 1993). Ligatürlerin uyguladığı kuvvet 50 ile 300 gr arasında değişebilmektedir(Nanda ve Ghosh, 1997). Genel kanı tel ligatürlerin uygulanan kuvvetin ligatürün sıkışmasını ayarlayarak değiştirilebilmesini sağladığından daha avantajlı olduğu yönündedir. Elastomerik ligatürler kolay uygulanmalarına karşın gevşek bağlanmış bir paslanmaz çelik ligatürden çok daha fazla sürtünme kuvveti oluşturmaktadır, fakat sürtünme kuvveti sıkıca bağlanmış bir tel ligatürü geçememektedir(Hain ve ark., 2003; Lima ve ark., 2010). Bağlama metodu ile ilgili yapılan çalışmalarda oluşturdukları sürtünme değerleri ile ilgili olarak farklı görüşler savunulmaktadır. Bazı araştırmacılar tel ligatürlerin kuvvet kontrolü sağladığını dolayısıyla daha avantajlı olduğunu savunurken, bazı araştırmacılar tel ligatürlerin bağlama kuvvetinin ligatürün tur sayısına bağlı olarak değişeceğinden farklı sonuçlara sebep olabileceğini savunurlar(Omana, 1992).

Bednar ve arkadaşları 1991 yılında yaptıkları çalışmada 0.016, 0.018, 0.016x0.016 ve 0.016x0.022 inç boyutunda paslanmaz çelik ark telleri kullanılmışlar, deneyleri kuru ortamda, Instron üniversal test cihazı ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda gevşek olarak metal ligatürle bağlanmış braketlerin elastik ligatürle bağlı braketlerden daha az sürtünme oluşturdukları bulunmuştur(Bednar ve ark., 1991).

Hain ve arkadaşları tükürük ile kayganlaştırıldığında elastik ligatürlerin kuru ortamdakinden %60 kadar daha az sürtünme kuvveti oluşturabildiğini göstermiştir(Hain ve ark., 2003).

Khatmakar, kuru ve ıslak ortamlarda paslanmaz çelik, teflon kaplı paslanmaz çelik ve elastik olmak üzere 3 farklı ligatür materyalini karşılaştırmıştır. Kuru ortamda teflon kaplı paslanmaz çelik ligatürün en az sürtünme kuvveti oluşturduğunu bulmuştur. Paslanmaz çelik ligatüründe elastomerik ligatürden anlamlı ölçüde daha az sürtünme kuvveti oluşturduğunu bulmuştur. Paslanmaz çelik ve teflon kaplı paslanmaz çelik ligatürün kuru ve ıslak ortamda sürtünme kuvvetlerinde anlamlı bir değişiklik olmadığını bunun aksine elastik ligatürün sürtünme kuvvetinin kuru ortamda ıslak ortama göre çok daha fazla olduğunu bularak Hain ve arkadaşlarının çalışmasıyla benzer veriler elde etmiştir(Khamatkar ve ark., 2015). Khamatkar'ın çalışmasıyla benzer sonuçlar elde eden pek çok çalışma mevcuttur(Franco ve ark., 1995; Vaughan ve ark., 1995; Bednar ve ark., 1991). Bunun yanı sıra elastik ligatürlerle paslanmaz çelik ligatürler arasında sürtünme açısından önemli bir fark olmadığını savunan çalışmalarda mevcuttur(Bazakidou ve ark., 1997; Frank ve Nikolai, 1980; Thorstenson ve Kusy, 2001).

## **2.2.2. Biyolojik Faktörler**

### **2.2.2.1. Tükürük**

Tükürük yapısının tel ile braket arasındaki sürtünme kuvveti üzerinde önemli etkisi vardır. Tükürüğün sürtünme üzerine etkisini inceleyen çalışmalarda doğal tükürük ve yapay tükürük kullanılmaktadır. Yapay tükürük elde edilmesi ve kullanımının kolay olması açısından çalışmalarda daha çok tercih edilmekle birlikte doğal tükürüğün bütün

yapısal özelliklerine ve fonksiyonlarına sahip olmaması nedeniyle bazı araştırmacılar tarafından kullanılması uygun bulunmamıştır(Tosun, 1999). Bunun yanı sıra doğal tükürüğün içeriğinin kişiden kişiye ve aynı kişide farklı zamanlarda değişebilmesi sebebiyle, çalışmalarda bir standart oluşturmak adına yapay tükürük kullanılmasını öneren araştırmacılar da vardır. Fakat bu amaçla kullanılan yapay tükürük formülasyonları çok çeşitlidir ve kimyasal ve fiziksel özellikleri değişebilmektedir(Gal ve ark., 2001). Bütün bu farklı özelliklerden dolayı yapılan pek çok çalışmada birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Baker ve arkadaşları 1987 yılında yapmış oldukları çalışmada kuru, yapay tükürüklü ve gliserinli ortamda paslanmaz çelik braket ve paslanmaz çelik ark tellerinin ortaya çıkardıkları sürtünme değerlerini incelemişlerdir ve araştırma sonucunda yapay tükürüğün varlığının sürtünme kuvvetinde %15- 19 oranında bir azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir(Baker ve ark., 1987).

Stannard 1986 yılında yaptığı çalışmasında nikel titanyum, paslanmaz çelik, beta titanyum ve krom kobalt ark tellerinin kuru ve ıslak ortamda paslanmaz çelik braketlerle oluşturduğu sürtünme kuvvetlerini değerlendirmiştir. Yapay tükürük ortamında paslanmaz çelik, nikel titanyum ve beta titanyum tellerde kuru ortama göre sürtünme kuvvet değerlerinde artış bulmuştur. Krom kobalt tellerde ise herhangi bir fark oluşmamıştır(Stannard ve ark., 1986).

Kusy ve Whitley 2003 yılında yaptıkları çalışmada beta titanyum ark telleri ve paslanmaz çelik braket arasındaki sürtünmeyi, insan tükürüğü, yapay tükürük ve kuru ortam olmak üzere üç farklı ortamda değerlendirmişler ve en az sürtünme kuvveti değerlerini insan tükürüğünde elde etmişlerdir. Yapay tükürük ortamında kuru ortama göre daha fazla sürtünme kuvveti değerleri elde etmişlerdir(R. P. Kusy ve Whitley, 2003).

Phukaoluan ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada paslanmaz çelik braketlerle niti ark telleri arasında oluşan sürtünme kuvvetleri kuru ortam ve yapay tükürük ortamında değerlendirilmiş ve yapay tükürük varlığının sürtünme kuvvetlerini azalttığı tespit edilmiştir(Phukaoluan ve ark., 2017).

### **2.2.2.2. Artık Birikiminin Etkisi**

Son yıllarda yapılan araştırmalar; tel ve braketler üzerindeki artık ve plak birikiminin, yüzey pürüzlülüğünü arttırarak daha yüksek sürtünme değerlerinin sistemde etkili olmasına yol açtığını göstermiştir(Normando ve ark., 2011). Bozulan yüzey özellikleri ve kullanılan braket ve teller üzerinde oluşan biyofilm tabakası sayesinde yüzeye tutunan organik ve inorganik maddeler mekanik kilitlenme alanları yaratarak tükürüğün yapışkan özelliği ile beraber sürtünmeyi arttırabilmektedir(Drescher ve ark., 1989).

Marques ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 0,019x0,025 inç paslanmaz çelik ark telinin kullanılmadan önceki debris miktarı, pürüzlülüğü ve paslanmaz çelik braketlerle yaptığı sürtünme kuvveti ölçülmüş daha sonra aynı ark teli oral ortamda 8 hafta tutulduktan sonra aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Oral kavitede 8 hafta kalan ark telinin debris miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve braketle oluşturduğu sürtünme kuvvetinde önemli derecede artış tespit edilmiştir(Marques ve ark., 2010).

### **2.2.2.3. Oral Fonksiyonların Etkisi**

Oral kavite konuşma, çiğneme, yutkunma gibi pek çok fonksiyonun gerçekleştirildiği dinamik bir ortamdır ve fonksiyonların ortaya çıkardığı anlık ya da periyodik titreşimler braket ve ark teli arasında açığa çıkan sürtünme kuvvetini etkilemektedir. Bunun yanı sıra yüksek tüberküllu dişler, oklüzyondaki erken temaslar veya yüksek düzeydeki çiğneme kuvvetleri gibi diş hareketlerine karşı direnç oluşturan ya da diş hareketlerini yönlendiren faktörlerde dişin ark teli üzerinde kaymasına engel olabilir ve sürtünme kuvvetlerinin daha da önem kazanmasına yol açar(Tosun, 1999). Braun ve ark., 1999 yılında yaptıkları çalışmada paslanmaz çelik braket ve ark teli kombinasyonları üzerine 20 ile 200 gr arasında değişen anlık titreşimler uygulamışlar ve sürtünme kuvvetlerinin %95,8 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Iwasaki ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise çiğneme dolayısıyla meydana gelen titreşimlerin sürtünme üzerine bir etkisinin olmadığı bulunmuştur(Iwasaki ve ark., 2003).

#### 2.2.2.4. Korozyon

Korozyon, metal veya alaşımlarının buldukları ortamlarla daha çok elektrokimyasal doğaya sahip fizikokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanır(Javaherdashti, 2008). Ağız içerisinde klor gibi agresif iyonlar, ortamdaki oksijen, çiğneme kuvvetleri, pH'daki değişiklikler ve sıcaklık değişimleri korozyon için uygun bir ortam hazırlar. Yeterli korozyon direnci bulunmayan metallerin ağız ortamı içerisinde kullanılması materyalin bozulmasına, renklenmesine ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olabilir. Bunun yanı sıra korozyon sonucu açığa çıkan maddeler biyolojik sistemi olumsuz etkileyebilir(Bergman ve ark., 1980; Wright ve ark., 1982).

Korozyon ortodontik sürtünme açısından hem bir sebep hem de bir sonuç olarak düşünülebilir. Pürüzlü yüzey korozyonun oluşma sürecini kolaylaştırabileceken, oluşan korozyon sonucu bozulan yüzey özellikleri de yine sürtünmeyi artırıcı rol oynayabilir(Lee ve ark., 2010). Bentahar ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları çalışmada, laboratuvar şartlarında korozyona maruz bırakılmış ark tellerinin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bir gün boyunca yapay tükürük içerisinde bekletilen örneklerde başlangıç korozyonu oluşmuş ve bu tellerde sürtünme bir miktar düşmüş olsa da, örnekler bir hafta boyunca tükürük içinde bekletilince sürtünme direnci artmış ve eski seviyeye gelmiştir(Bentahar ve ark., 2010). Yapılan çalışma korozyonun sürtünme direnci açısından belirleyici bir etken olabileceğini göstermektedir.

Tüm bu anlatılan faktörlerle beraber ortodontide meydana gelen sürtünme kuvvetleri çok sayıda ve bazıları da hala bilinmeyen sebeplere bağlı olarak ortaya çıkan bir olaydır. Günümüz teknolojisi ile bütün bu faktörleri kontrol altında tutmak imkansız olsa da gelişen materyal teknolojisi sayesinde arzu edilen diş hareketlerini oluşturabilme şansına sahiptir. Sürtünmenin malzemelerden tamamen elimine edilmesi muhtemel olmadığı için, ortodontik cihazların yüzey özellikleri geliştirilerek verimliliğinin artırılması ve sürtünmenin kontrol altında tutulması doğru bir yaklaşımdır.

### 2.3. SÜRTÜNMEYİ AZALTMAK AMAÇLI YAPILAN YÜZEY ÇALIŞMALARI

Sürtünmeyi etkileyen en önemli faktörlerden biri materyallerin yüzey özellikleridir. Bunu inceleyen triboloji bilimi kapsamında malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve yapısını daha kaygan hale getirebilmek için çeşitli yüzey geliştirme yöntemleri mevcuttur. Triboloji alanında yapılan araştırmalar genellikle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, sürtünme ve aşınmaya sebep olan yüzeylerin birbirleriyle temaslarını kesecek ince film malzemelerin veya endüstriyel yağlarının bulunması gibi konuları içerir.

Materyallerin yüzey özelliklerini geliştirmek için mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olan birçok yöntem kullanılmaktadır. Mekanik yöntemlere örnek olarak, yüzeye farklı ancak özgül bir pürüzlülük sağlayan işleme, parlatma, ışınlama gösterilebilir. Fiziksel yöntemler; oksidasyon, metallerin ve alaşımların pasifleştirilmesinin yanında aynı zamanda bir koruma veya aktivasyona yol açan herhangi bir yüzey kaplaması gibi işlemleri içerir. Kimyasal ve biyolojik yöntemlere ise materyallerin biyoaktif moleküllerle kaplanmasını içeren biyomimetik kaplamalar örnek verilebilir(Hildebrand ve ark., 2006).

Kaplamaların uygulanması, malzemelerin yüzeyini değiştirmek için mevcut olan yaklaşımlardan biridir. Yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli kaplama teknikleri ve malzemeleri kullanılmıştır.

Yüzey aşınmasının, metal nitridler, karbidler ve karbonitritler (TiN, TiCN, TiAlN, vb.) gibi sert ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar ve ayrıca elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar ile önemli ölçüde azaltılabileceği bilinmektedir.

Elmas Benzeri Karbon (Diamond-like Carbon-DLC), elmas ve grafit gibi kristal yapıları karbonlarla benzeyen bazı ilginç özelliklere sahip amorf bir karbon yapısıdır. Biyomedikal uygulamalar için kullanılan DLC kaplamalar; yüzey pürüzsüzlüğü, düşük sürtünme direnci, yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik, yüksek korozyon direnci ve biyoyumluluğu gibi mükemmel özellikleri sayesinde araştırmacılar için her zaman ilgi odağı olmuştur(Sol Aisenberg ve Chabot, 1971; Bentahar ve ark., 2008; Evans ve ark.,



1991; T. Kang ve ark., 2015; Kobayashi ve ark., 2007; Kobayashi ve ark., 2005; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011).

### 2.3.1. İnce Film Kaplamalar

İnce filmler, birkaç biriktirme tekniğinden biri kullanılarak bir substrat üzerine biriktirilmiş yapay hetero yapılardır. İnce filmler katı maddelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Geliştirilebilen yüzey özelliklerine örnek olarak iletim, yansıma, absorpsiyon, sertlik, aşınma direnci, korozyon, nüfuz etme ve elektriksel davranış sayılabilir(Frey, 2015). İnce film kaplamaların özellikleri biriktirme yöntemine, substrat malzemesine, substrat sıcaklığına, biriktirme hızına ve arka plan gazı basıncına büyük ölçüde bağlıdır. İnce film kaplamalar kalınlıkları 0,1-10 µm arasında olan kaplamalardır ve kaplamanın birikmesi atomik düzeyde gerçekleşmektedir.

#### 2.3.1.1. Elmas Benzeri Karbon (DLC)

##### Yapısı

Karbon periyodik cetveldeki en dikkat çekici elementlerden biridir. Bilinen tüm kimyasal maddelerin %90'ından fazlasında bulunur. Elementlerin atomlarının uzayda farklı şekilde dizilimleri ile oluşan yapılara allotropi denir ve karbon en fazla allotrop sayısına sahip olan elementtir. Karbon allotropları, Ströck tarafından 2006'da sekiz alt grup altında sınıflandırılmışlardır. Hepsi karbon atomlarının farklı şekillerde bağlanması sonucunda ortaya çıkmıştır ve her biri birbirinden farklı özellikler gösterirler. Bunlar:

- elmas
- grafit
- lonsdaleite
- fulleren C60
- fulleren C540

- fulleren C70
- amorfor karbon
- tek katmanlı karbon nanotüpüdür.

Elmas karbonun temel allotropudur. Birçok üst düzey özelliği sebebiyle bilim adamlarının her zaman ilgisini çekmiştir. Doğadaki tüm malzemeler içerisinde en yüksek elastiklik modülü ve ısı iletkenlik değerine sahip malzemedir. Bilinen en yüksek sertlik derecesi ve atomik yoğunluğa sahip olmasının nedeni yapısındaki kimyasal bağlar ve bu bağların ideal geometrik düzenleridir. İçerdiği karbon atomlarından her biri dört karbon atomuna tamamen kovalent bağlar ile bağlanmıştır(Callister, 1994).

Karbon bazlı katı malzemeler, elmasın sahip olduğu yüksek sertlik ve ısı iletkenlik özellikleri gösterebildiği gibi grafitin sahip olduğu yumuşaklık ve kayganlık gibi nadir bulunan özelliklerde gösterebilirler. Son otuz yıl boyunca, karbon; ince elmas, elmas benzeri karbon (DLC), karbon nitrür, bor karbür, sayısız geçiş metal karbürü ve karbon nitrür kaplamalarının sentezlenmesinde ana unsur olmuştur. Bu kaplamalar olağanüstü mekanik ve tribolojik özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında sürtünmeyi ve aşınmayı kontrol edebilmek için kendilerine geniş bir kullanım alanı bulmaktadırlar. 1980'lerde çok az araştırmacı bu kaplamalar üzerinde çalışırken 1990'larda bu kaplamalarla ilgili yapılan çalışmaların hızında artış olmuştur. 2000'lerde bu kaplamalar daha da ilgi çekmeye başlamıştır ve günümüzde de birçok bilimsel araştırmanın konusunu oluşturmaktadır(Donnet ve Erdemir, 2007).

Sert amorf karbon filmleri ilk olarak 1953'te Schmellenmeier tarafından, iyon ışını biriktirme tekniğiyle(ion beam deposition) elde edilmiştir. Bu tabakaların yapısının, biriktirme parametrelerine bağlı olarak polikristalin amorf yapıda olduğu belirtilmiştir(Enke ve ark., 1980).

Sert amorf karbon filmleriyle ilgili bir sonraki dikkat çekici yayın, ilk kez "elmas benzeri karbon" teriminin kullanıldığı 1971'de yayınlanan Aisenberg ve Chabot'un çalışmasıydı. Yine aynı teknikle elde edilen filmlerin yazarlar tarafından çizilmeye karşı dayanıklı, elektriksel olarak yalıtkan, optik olarak saydam ve kimyasal olarak dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Bu elde edilen filmler endüstriyel çelik kesme

bıçaklarını kaplamak için kullanılmıştır ve bu bıçaklar kağıt kesme işleminde kullanılmıştır. Kaplamalı bıçakların sürtünme kuvveti, kaplanmamış bıçaklarınkinden yaklaşık beş kat daha düşük bulunmuştur ve kullanım süreleri 10 kat daha uzun olmuştur. Sonuç olarak kaplamalı bıçaklarla yapılan aşınma testleri, bu filmlerin sürtünme katsayısını düşürdüğünü göstermiştir(S Aisenberg ve Chabot, 1973).

Amorf elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar, düşük sürtünme katsayıları, yüksek sertlik ve aşınma direnci, IR spektral aralığında optik saydamlık ve düşük elektriksel iletkenlik gibi üstün özellikleri ile bilinmektedir(Bewilogua ve ark., 2004).

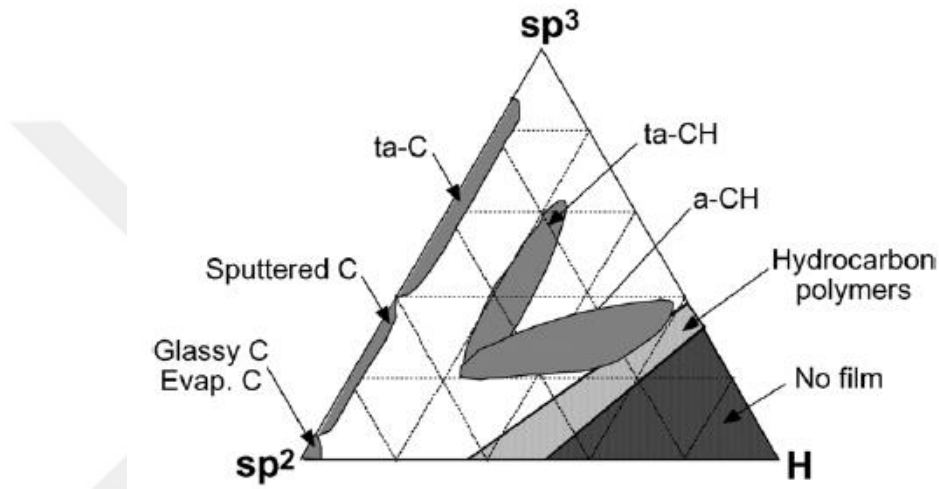
Günümüzde DLC kaplamaları, otomotiv uygulamaları başta olmak üzere mikroelektrik, optik, nakliye, imalat gibi pek çok endüstriyel sektörün yanı sıra biyomedikal sektörde de kendine geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Yapısal olarak, DLC filmleri  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibritleşmesi yapmış karbon atomlarından oluşmaktadır. Bazı biriktirme koşulları altında eser miktarlarda  $sp^1$  bağlanması da mümkündür, ancak bağların kütlesi ağırlıklı olarak  $sp^2$  ve  $sp^3$ 'tür. Filmler bir hidrokarbon kaynağından (asetilen veya metan gibi) elde edilirse, yapıları içinde büyük miktarlarda hidrojen de bulunabilir(Donnet ve Erdemir, 2007). DLC, dört alt grup altında sınıflandırılmaktadır(Andrea Carlo Ferrari ve Robertson, 2004).

- Amorf karbon (a-C) ( $sp^3$  bağ oranı düşük film)
- Hidrojenize amorf karbon (a-CH) ( $sp^3$ bağ oranı düşük hidrojen içeren film)
- Tetragonal amorf karbon (ta-C) ( $sp^3$  bağ oranı %70'den fazla olan film)
- Hidrojenize tetragonal amorf karbon (ta-CH) (Hidrojen içeren  $sp^3$  bağ oranı fazla olan film)

Elmas benzeri karbonun bağ yapılarının incelenmesi için, bu filmler üzerinde en kapsamlı yapısal ve kimyasal çalışmaları spektroskopik teknikler kullanarak yapmış olan Ferrari ve Robertson tarafından bir diyagram kullanılması önerilmiştir(Andrea C Ferrari ve Robertson, 2000). Faz diyagramı 3 ana bölgeyi içermektedir. Diyagramda C  $sp^3$ , C  $sp^2$  ve hidrojen(H) atomlarının oranlar toplamı 1'e eşittir. (Şekil 2.7.) Bu üçlü diyagramda, çeşitli DLC filmlerinin bölgeleri açıkça tanımlanmıştır ve  $sp^3$  bağlarının ve hidrojen içeriğinin fraksiyonuna dayanarak, filmler daha önce bahsedilen

sınıflandırmaya dahil edilir. Yüksek oranda  $sp^2$  hibridizasyonlu karbon atomuna sahip filmler nispeten yumuşak olma eğilimindedir ve tribolojik testler sırasında grafit gibi davranırken, daha fazla  $sp^3$  hibridizasyonlu karbon içeren filmler daha çok elmas benzerler ve dolayısıyla süper sertlik ve etkileyici tribolojik özellikler gösterirler. Üçgenin tepe noktasına doğru gidildikçe yapı içerisindeki  $sp^3/sp^2$  bağ oranı arttığından, elmas benzeri özelliklerde artış gözlenecektir(Erdemir ve Donnet, 2007).



Şekil 2.7. Üçlü faz diyagramı çeşitli DL filmleri ve diğer karbon filmleri göstermektedir.

Malzemenin bağ yapısı, ortaya çıkardığı özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Farklı kaplama şartlarında uygulanan DLC'nin bağlanma ve mekanik özelliklerindeki değişimler çok geniş bir araştırma konusu olmuştur. Kaplama yöntemine ve parametrelerine bağlı olarak,  $sp^2/sp^3$  bağ oranı değişebilir ve elde edildikleri kaynağa göre bu yapılar içerisinde yüksek oranda hidrojene de rastlanılabilir. Dolayısıyla, DLC filmlerin özellikleri buna bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu kadar geniş çeşitlilikte film yapıları ve bileşimleri ve DLC filmlerinin üretimi için mevcut olan yöntemlerin çeşitliliği diğer sert kaplama türlerinde mümkün değildir(Donnet ve Erdemir, 2007).

## **DLC'nin Biyomedikal Kullanım Alanları**

DLC kaplamalar endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmasının yanı sıra biyomedikal olarak da geniş kullanım alanına sahiptir. DLC kaplamalarının biyoyumluluğu yapılan birçok çalışmada ortaya konmuştur. Yapılan stres analizleri, malzeme yüzeylerinde oluşacak adezyona karşı dirençleri ve biyomedikal uygulamalarda biyoyumlulukları gibi pek çok durumda test edilerek kullanımları onaylanmıştır(LaVan ve ark., 2005; Linder ve ark., 2002; Okpalugo ve ark., 2004). Bu kaplamalar; eklem yüzeyleri, kalp kapakçıkları, stentler, kontak lensler ve implantlar gibi biyomedikal alanlarda kullanılmaktadır.

DLC biyomedikal alanda başlıca; cerrahi implantlarda yüzey korozyon koruyucusu olarak, ortopedik implantlarda aşınma direncinin artırılması ve iyon salınımının engellenmesi amacıyla, üst düzey fiziksel özellikleri nedeni ile medikal aletlerde, ağız içi akrilik protez diş yüzeylerinde aşınma direncinin artırılması amacıyla, kullanılmaktadır(Grill, 2003).

Cerrahi implantların çevresinde kemik oluşumu için osteoblast hücrelerine ihtiyaç vardır. Bunun yanında implant yüzeyine bakteriyel adezyonu engellemek ve implant fonksiyonunu korumak için hücre ve protein bağlantısını engellemek gerekir. Tüm bu sayılan sebeplerden dolayı implantların yüzey özelliklerini geliştirebilmek için bu kaplamalar uygulanmaktadır(Hauert ve ark., 2013).

DLC kaplamalar, düşük yüzey pürüzlülüğü nedeniyle bakteriyel ve partikül yapışmasının minimum olmasına bağlı olarak kalp damar cerrahisinde damar içi stentlerde kullanılmaktadır(Hasebe ve ark., 2006; Maguire ve ark., 2005; Yang ve ark., 2003). Ayrıca kullanılan cerrahi stentlerden iyon salınımı olabildiği de bilinmektedir. Bu sebeplerden dolayı cerrahi stentlerin trombojenik olmayan sert karbon filmleri ile kaplanması her zaman araştırılan ve ilgi çeken konulardan olmuştur.

Guthenson ve arkadaşlarının, 2000 yılında nikel (Ni), krom (Cr), molibden (Mo) ve mangan (Mn) üzerinde yaptıkları element analizleri doğrultusunda, DLC kaplama yapılmamış metal cerrahi stent örneklerinde iyon salınımında önemli derecede artış

olduğunu ortaya koymuşlardır. DLC kaplama yapılmış cerrahi stentlerde ise iyon salınımı söz konusu olmamıştır(Gutensohn ve ark., 2000).

İyon salınımı ile ilgili yapılan bir başka çalışmada nikel titanyum ark telleri DLC ile kaplanmış ve nikel salınım miktarları araştırılmıştır. Nikelin alerjenik, sitotoksik bir madde olduğu bilinmektedir. Teller squamoz karsinom hücreleri içeren fizyolojik salin solüsyonu içinde 6 ay bekletilmiş ve solüsyondaki nikel oranları ölçülmüştür. Nikelin karsinom hücrelerine karşı sitotoksik etkisi olduğu için deney sonunda bu hücrelerin miktarlarına bakılmıştır. Kaplanmış tellerin bulunduğu ortamdaki karsinom hücreleri sayısında önemli oranda artış görülürken kaplanmamış tellerin olduğu ortamdaki hücrelerin sayısında belirgin artış olmamıştır. Kaplanmış tellerin olduğu solüsyondaki nikel oranı kaplanmamış tellerin olduğu solüsyondaki nikel oranına göre 6 kat daha az bulunmuştur ve bu durum hücre sayısı artışını açıklamaktadır. Bu çalışma koroziv ortamlardaki DLC'nin difüzyona ve sitotoksositeye karşı koruyucu olduğunu kanıtlar niteliktedir(Kobayashi ve ark., 2007). Benzer bir başka çalışmada NiTi ark telleri üzerine uygulanan DLC kaplamalar nikel iyon salınımını kaplamasız olanlara göre %80'ler oranında azaltmış ve ark tellerinin kararlılığını artırmıştır. Ayrıca DLC kaplamalar ağız boşluklarındaki degradasyonu önlemiş, biyoyumluluğu artırmıştır(Ohgoe ve ark., 2006).

DLC kaplama ile kontak lenslerin oftalmolojik uygulamalarının geliştirilebildiğini ortaya koyan birçok çalışma mevcuttur(Sleptsov ve ark., 1996). Kontakt lenslerde DLC' nin yüzeyde biyofilm oluşumunu düşürücü ve antibakteriyel özelliklerinden yararlanılmıştır.

Katsikogianni tarafından yapılan çalışmada, yüzeylerin kimyasal özelliklerinin ve pürüzlülüğünün bakteriyel adezyonu oldukça etkilediği ve kaplamanın mükemmel yüzey pürüzsüzlüğü sağlayıp implante edilmiş tıbbi cihazlardaki bakteriyel yapışmayı ve kolonizasyonu önemli ölçüde inhibe ettiği bulunmuştur(Katsikogianni ve ark., 2006). Bu çalışma karbon kaplamaların antibakteriyel mekanizmalarını açıklamaktadır.

Quiryne ve arkadaşları, 0.2 µm'den küçük yüzey pürüzlülük değerlerinin mikrobiyal tutunmayı azaltma yönünde ekstra bir avantaj sağlamadığını rapor etmişlerdir(Quiryne ve ark., 1996). Rimondini ve arkadaşları, yüzey pürüzlülüğü 0,088

um'den düşük olduğunda titanyum yüzeylerin bakteriyel plak birikimini engellediğini iddia etmektedir(Rimondini ve ark., 1997). Pier-Francesco ve arkadaşları ise pürüzlülüğü çok pürüzsüz (Ra  $34,57 \pm 5,79$  nm), pürüzsüz (Ra  $155,00 \pm 33,36$  nm), pürüzlü (Ra  $233,24 \pm 9,86$  nm) ve çok pürüzlü (Ra  $449,42 \pm 32,97$  nm) olarak kategorize etmiştir ve yaptıkları in vitro çalışmada çok pürüzsüz yüzeylerde bakteriyel adezyonda belirgin bir azalma olduğunu belirtmiştir(Pier-Francesco ve ark., 2006).

DLC kaplamalar ağız içi implantlarda da pek çok araştırmaya konu olmuşlardır. Bir implantın uzun süreli kullanımı için implant ile implant üstü protezin temas yüzeyinin uyumlu olması ve ömür boyu stabil kalması gerekir. Vida sıkma işlemi sırasında ortaya çıkan stres aynı zamanda abutment vidasının gevşemesi açısından kritik faktördür. Kim ve arkadaşları bu konuyla ilgili yaptıkları çalışmalarında vida gevşemesinde sürtünme ve aşınma faktörlerini incelemişlerdir ve vidaları DLC ile kaplamışlardır. DLC kaplı vidaların gevşemeye karşı daha dirençli olduklarını bulmuşlardır(Kim ve ark., 2005). De Maeztu ve arkadaşları, erken protetik yüklemeye izin verecek yeterli kemik miktarının sağlanacağı süreyi kısaltmak için implant yüzeyinde DLC kaplamayı kullanmışlardır(De Maeztu ve ark., 2007).

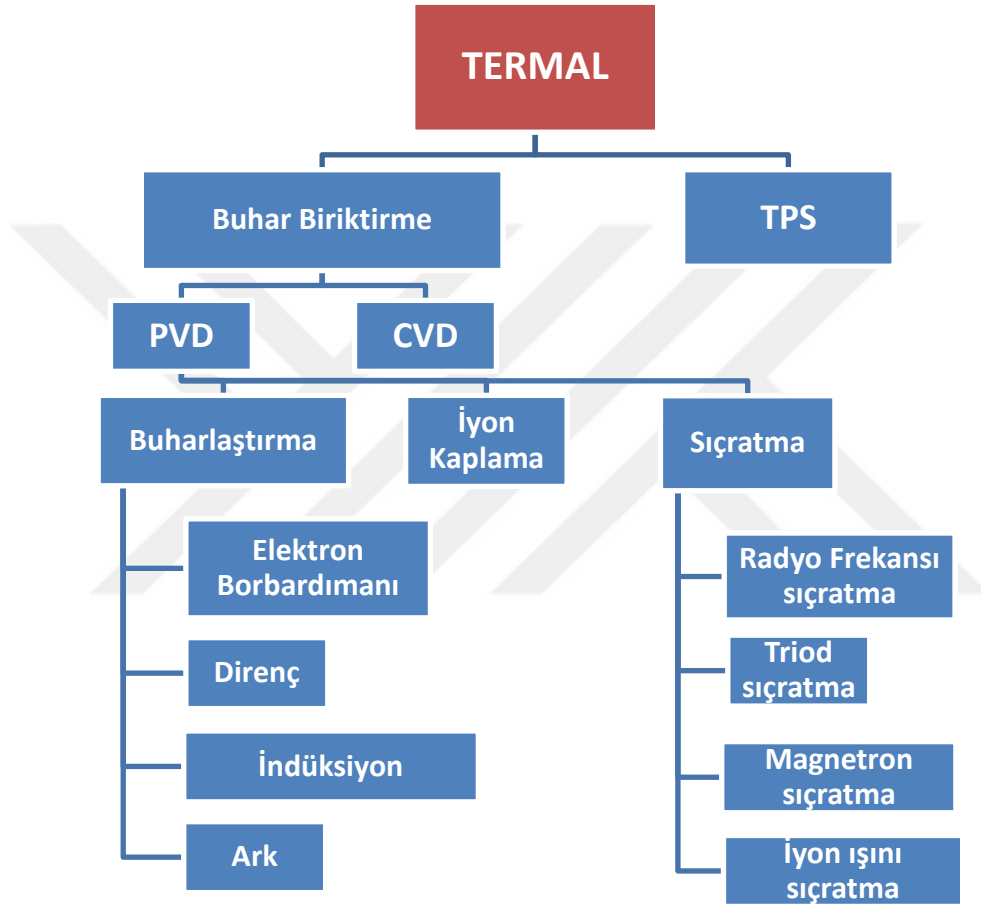
Wongsarat ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada ise ortodontik magnetler üzerinde DLC kaplamanın korozyonu azaltıcı etkisi incelenmiştir. Korozyon etkisinin test edilmesi sırasında ağız ortamını simüle edebilmek için dental sıvı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda DLC' nin materyal üzerindeki korozyon önleyici etkisi ortaya konmuştur(Wongsarat ve ark., 2012).

### **2.3.2. İnce Film Kaplama Metotları**

Kaplama yöntemlerinin uygulama alanının belirlenmesinde iki parametre esas olarak alınır. Bunlar, kaplama kalınlığı ve uygulama sıcaklığıdır. Kaplamanın kalınlığına göre uygulanan kaplamalar ince film ve kalın film kaplamalar olarak ikiye ayrılır(Holmberg ve Matthews, 1994). İnce film kaplamalar kalınlıkları  $0,1-10$   $\mu\text{m}$  arasında olan kaplamalardır ve kaplamanın birikmesi atomik düzeyde gerçekleşmektedir. Kalın film kaplamalarda ise birikme büyük kütlelerin transferi ile gerçekleşmektedir(Bhushan, 2000). Kaplama yapılırken kullanılan birçok teknik

mevcuttur. Temel olarak ince film kaplamalar kimyasal ve termal yöntem olmak üzere iki yöntemle yüzeyler üzerine uygulanmaktadır. DLC kaplamalar ise termal yöntemlerle uygulanmaktadır. (Tablo 2.1.)

**Tablo 2.1.** Termal kaplama yöntemleri



DLC film kaplamaları üretme ve yüzey üzerine biriktirme genel olarak iki metotla yapılmaktadır:

- 1- Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği (PVD)
- 2- Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniği (CVD)

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), elementler, metaller ve bunların alaşımları dahil olmak üzere, neredeyse tüm metalik veya seramik bileşikleri kaplamak için kullanılan



en yaygın yöntemlerden biridir. Bu teknikle yapılan kaplama işlemi, ısı aktivasyonlu gazlı kimyasal bileşiklerin reaksiyonu ile olur. CVD işlemi, gaz halindeki maddelerden solid materyaller elde edilerek bu maddelerin yüzey üzerinde biriktirilmesi işlemidir ve bu işlem uçucu prekürsörler ile kaplanacak malzemelerin yüzeyi arasındaki kimyasal bir reaksiyonla sağlanır. Öncü gazlar ısıtılmış substratın yüzeyinden geçerken, ortaya çıkan kimyasal reaksiyon sonucu substrat üzerinde biriken katı bir faz oluşur. Kaplama işlemi için gerekli olan sıcaklık yaklaşık 900-1050°C'dir. CVD tekniği kendi içinde pek çok farklı yöntem içerir. Bunlar; atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme, metal-organik kimyasal buhar biriktirme, düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme, lazer kimyasal buhar biriktirme, fotokimyasal buhar biriktirme, kimyasal buhar infiltrasyonu, kimyasal ışın epitaksi, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme(PECVD) yöntemleridir(Makhlouf, 2011).

Kimyasal buhar biriktirme yönteminin 90'lı yıllardaki yoğun kullanımından sonra, yüksek ısı gereksiniminin dezavantajları nedeniyle daha düşük ısılarda çalışılabilen Physical Vapor Deposition(PVD) yani fiziksel buhar biriktirme yöntemi geliştirilmiştir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği katı bir kaynağın vakum altında buharlaştırılması veya atomal hale dönüştürülmesi ile atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak olan taban malzemesi yüzeyine atomal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), materyalin vakum koşulları altında atomik seviyedeki transferini içeren bir kaplama tekniğidir. PVD'de metal buharı farklı gazlar ile reaksiyona girerek ince bir film tabakası oluşturulur. Bu yöntem, bazı açılardan CVD'ye benzemekle birlikte ikisi arasındaki temel fark PVD'de öncüllerin başlangıç fazında katı halde reaksiyona girmesi, CVD'de ise öncüllerin reaksiyon haznesine gaz halinde başlamasıdır. PVD ile DLC kaplama işlemi için gerekli sıcaklık ideal şartlarda 250-450°C'dir(Makhlouf, 2011). PVD kaplamaların biriktirilmesi için ise parçacık sıçratılması, buharlaştırma ve elektron demeti ile koparma gibi birden fazla metot vardır. (Tablo 2.1) Sıçratma ve buharlaştırma, ince film biriktirmek için en yaygın kullanılan PVD yöntemleridir. Sıçratma sırasında buhar, enerjik gaz iyonlarıyla bombardımana tutulan metal bir hedef tarafından oluşturulur. Tüm PVD işlemleri yüksek vakum koşullarında gerçekleştirilir. PVD tekniği kullanılarak seramik nitelikli sert aşınmaya dayanıklı nitrürler (TiN, CrN, ZrN, TiAlN gibi), karbonitrürler (TiCN gibi), oksitler (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi), borürer (ZrB, TiB<sub>2</sub> gibi), karbürler (TiC gibi) elmas benzeri

karbon kaplamalar, sürtünme özelliklerini geliştirmeye yönelik MoS<sub>2</sub>, hidrojenli elmas benzeri karbon kaplamalar üretilebilmektedir. Kaplamalar; tekli, çoklu ve kademeli tabakalar halinde de biriktirilebilir. Kaplama kalınlığı genellikle 1 ila 5 µm arasında değişir ancak birkaç yüz nanometreye kadar ince veya 15 mikrometreye kadar kalın olabilir.

PVD tekniği 4 aşamadan oluşmaktadır:

1. Yüksek enerji kaynağı tarafından biriktirilecek olan malzemelerin buharlaştırılması (Bu işlem yüzeyden atomların buharlaşmasını sağlar. Bir malzeme buharlaştırma, sıçratma, lazer desteği, elektrolit, kimyasallar, plazma sprey, gazlar, buharlar ve bunun gibi birçok farklı yöntemle buhar fazına geçirilebilir)
2. Buhar ürünün kaplanacak olan tabakaya taşınması(buhar ürünü kaynaktan alt malzemeye moleküller veya atomlar kendi aralarında çarpışarak veya çarpışma olmaksızın taşınabilir ve transfer sırasında bir miktar buhar ürünü plazma oluşturarak iyonize olabilir).
3. Taşınma işlemi sırasında metal atomları ve reaktif gazlar(oksijen,nitrojen,metan gibi) arasında reaksiyon oluşması
4. Kaplamanın substrat yüzeyinde biriktirilmesi (bu adım buhar ürünün alt malzeme yüzeyinde yoğunlaşmasını ve çekirdeklenme ile film gelişimi adımlarını kapsar)

Bu adımların birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilme derecesi biriktirme işleminin çok yönlülüğünü ve esnekliğini belirler. PVD tekniklerinde bu adımlar bağımsız olarak kontrol edilerek, yapı, özellik ve biriktirme hızının kontrolünde üstün esneklik sağlar.

### **2.3.2.1. Manyetik Alanda Sıçratma(Magnetron Sputtering) Metodu**

Sıçratma ile kaplama, PVD kaplama yöntemleri arasında sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Sıçratma, enerjistik parçacıklar ile yüzeyin bombardıman edilmesi

sonucu momentum değişimi sağlanarak sıvı veya katı yüzeyinden malzemenin koparılması ve taşınması işlemidir. Bu yöntemde; vakum ortamındaki, kaplama için kullanılan 1-5 kV aralığında değişen negatif potansiyel uygulanmış hedef yüzeyini (kaplama malzemesi kaynağı), yüksek enerjili iyonlarla bombardıman ederek atomların kopartılması sağlanır. Momentum değişim mekanizması ile hedef malzemedeki bu şekilde atom koparılmasına sıçratma adı verilir. Kopartılan bu atomlar oluşan plazma içerisinde buhar fazına geçer ve taban malzeme yüzeyinde biriktirilir. Sıçratma işleminde plazma oluşumunu başlatabilmek için diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek inert gaz iyonları kullanılır ki, en yaygın olarak kullanılan gaz Argon gazıdır.

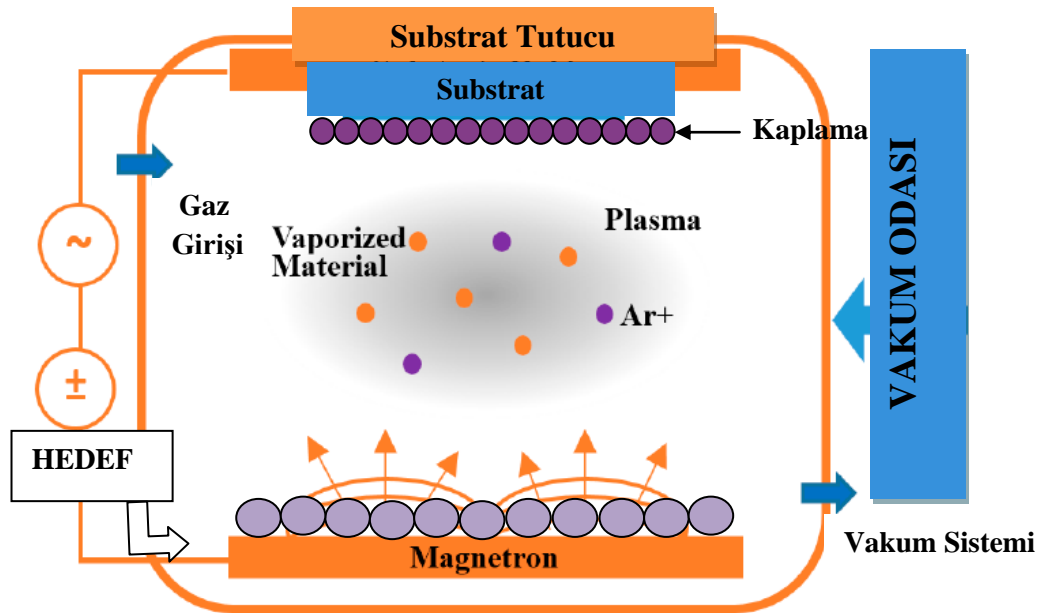
Sıçratma yönteminin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesidir. Ayrıca bu yöntemde film yapısına makro partiküllerin girme olasılığı çok düşüktür. Elde edilen kaplamaların alt malzemeye yapışması oldukça iyidir ve alt malzemenin sıçratma ile temizlenmesi ile daha da iyi hale getirilebilir. Sonuç olarak sıçratma ile elde edilen filmin kalitesi, yapısı ve eş biçimliliği mükemmeldir(Calıskan, 2008).

Bu yöntemde hedef malzeme, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hedefin merkez eksenine, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. Zıt kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesiyle oluşan manyetik alan, iyon bombardımanı ile katot yüzeyinden yayılan ikincil elektronların, bu bölgede tutularak iyonizasyonun ve plazmanın yoğun olmasına neden olur.

Magnetronlarda temel prensip olarak, hedef yüzeyine paralel olarak düzenlenmiş bir manyetik alan tarafından, ikincil elektron hareketi hedef etrafına doğru zorlanmaktadır. Mıknatısların bir kutbu hedefin merkezine yerleştirilmiş, ikinci kutbu ise, bir mıknatıslar halkası oluşturacak şekilde hedefin dış kenarı etrafında dizilmişlerdir. Bu şekilde elektronlar tuzağa düşürülerek, iyonlaşma için elektron-atom çarpışması olayının olasılığı büyük ölçüde artırılmaktadır.

Bütün bu yöntemlerde buharlaşan malzeme, düşük basıncın etkisiyle reaktif gaz ile çarpışmalar geçirir ve vakum odası içerisinde yayılmaya başlar. Kaplanacak taban malzeme yüzeyinde bu buhar ile temas halinde olan yerlerde yoğunlaşma olur ve kaplama gerçekleşir. Bu şekilde sadece temas yüzeylerinde kaplamanın gerçekleşmesi, özellikle karmaşık şekilli parçalar için dezavantaj oluşturur.

Püskürtme işlemi ile ilgili olarak, magnetron püskürtme işlemi kullanılırken birkaç malzemenin ince katmanları uygulanır. Bu vakum kaplama işlemi için hammadde bir hedef şeklini alır. Püskürtme işlemlerinde hedefin yakınına bir magnetron yerleştirilir. Daha sonra, vakum bölgesinde, hedef ile substrat arasında, magnetron yönünde yüksek bir voltaj uygulanarak hızlandırılan ve hedeften atom boyutunda partiküllerin salınmasını sağlayan inert bir gaz verilir. Bu parçacıklar, substrata giden hedefe ulaşan ve katı bir ince film oluşturan gaz iyonları tarafından iletilen kinetik enerjinin bir sonucu olarak yansıtılır. Bu teknoloji, yüzey üzerinde yer alan önceki kirlenmelerin yüzeyden temizlenmesini sağlar ve bu, genellikle katodik temizlik olarak adlandırılan, substrat ile hedef arasındaki voltaj kutuplarının tersine çevrilmesi olayıdır. (Şekil 2.8.)



Şekil 2.8. Magnetron sıçratma sistemi

## 2.4. YÜZEY ANALİZ YÖNTEMLERİ

Malzemelerin yüzeylerinin mekanizmalarını ve davranışlarını anlamak için yüzey analizi teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yıllar boyunca yapılan çalışmalar sonucunda, yüzeylerin fiziği ve kimyasının farklı yönlerini araştırarak çok sayıda teknik geliştirilmiştir. Bu tekniklerin pek çoğunda yüzeylerin kimyasal bileşimini veya yapısal içeriğini elde etmek için, yüzeylerin fotonlar, elektronlar veya iyonlarla bombardıman edilmesi gerekmektedir(Yan, 2010).

### 2.4.1. SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), solid malzemelerin yüzeylerini elektron ışını ile tarayarak yüksek çözünürlüklü elektronik görüntülerini sağlayan bir mikroskop çeşididir. Farklı elementlerin atomları farklı miktarlarda karakteristik elektronlar yaydığı için bunun sonucunda oluşan görüntülerin kontrastı yüzey numunesinin bileşimi hakkında bilgi sağlar(Arenas-Lago ve ark., 2017). Manfred von Ardenne tarafından 1930'lu yıllarda geliştirilmiştir.

Numunelerin içinden geçen ve numune tarafından absorbe edilenler arasında elektronlar (Auger elektronları, ikincil elektronlar (SE'ler) ve geriye saçılmış elektronlar), X ışınları (karakteristik X ışınları ve Bremsstrahlung Xray radyasyonu), ışık (ultraviyole, görünür ve kızılötesi) ve ısıda bulunur. Bu sinyaller ile, numuneyi yüzey morfolojisi, yapısal topografyası ve kimyasal bileşimi açısından gözlemlemek ve karakterize etmek mümkündür(de Assumpção Pereira-da-Silva ve Ferri, 2017). Morfoloji şekli ve boyutu belirtirken, topografya bir nesnenin yüzey özelliklerini, nasıl görüldüğünü, dokusunu, pürüzlü olup olmadığını gösterir. SEM, bir parçacığın 1 nm'lik boyutlara kadar yüksek kaliteli ve uzaysal çözünürlüğe sahip detaylı görüntüsünü verebilir. Bu tür cihazların büyütme oranları 300.000 kata kadar çıkabilmektedir(Goldstein, 2012).

SEM sisteminde yüksek enerjili elektronlar ile malzemenin atomlarının dış yörünge elektronları arasında elastik olmayan bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşim sonucunda Auger elektronları oluşur. Yörünge elektronları ile süregelen iletişim sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan yüksek enerjili elektronlar numune yüzeyine doğru hareket ederler. Bu elektronlara ikincil elektron adı verilir. İkincil elektronlar, numune odası sintilatöründe toplanarak numune yüzeyinin 10nm ve daha düşük derinliklerinden alınan yüksek çözünürlüklü topografik görüntüsünü oluşturmak üzere görüntü sinyaline çevrilir(Sampson, 1996).

Taramalı elektron mikroskobu, büyüme yapısı, kaplama hataları, yüzey karakteristiği, kaplama kalınlığının belirlenmesi gibi kaplama özelliklerinin araştırılmasında kullanılan kaplama teknolojisinde önemli yere sahip bir analiz yöntemidir.

#### **2.4.2. AFM Analizi**

Atomik kuvvet mikroskobu(Atomic Force Microscope) atomik boyutlara kadar sivriltilmiş bir iğne ucu yardımıyla, yüzeyin yüksek çözünürlükte, üç boyutlu görüntülenmesini sağlayan bir mikroskop türüdür. AFM 1980’de Binning ve Rohrer tarafından IBM Research - Zürih’te geliştirilmiş, araştırmacılara 1986 Nobel Ödülü’nü kazandırmıştır. Görüntüleme, iğne ucunun yüzey ile etkileşiminin incelenmesi sonucunda gerçekleştirilir. Kontak modunda, gezici uç ile numune arasındaki itme kuvveti (nanonewton büyüklüğünde) sabit kalacak şekilde gezici uç numune üzerinde gezdirilir. Eğer gezici uç bir çıkıntı ile karşılaşrsa gezici uç ile numune arasındaki itme kuvveti artar. Değişik amaçlar için farklı iğne uçları kullanılır. Atomik kuvvet mikroskobu üç farklı teknik ile kullanabilmektedir. Bunlar; iğnenin yüzeye temas ettirilerek uygulandığı temas yöntemi, iğnenin yüzeye temas etmediği temassız yöntem ve iğnenin yüzeye vurularak uygulandığı aralıklı temas veya dokunma yöntemidir(O’Connor ve ark., 2013; Vickerman ve Gilmore, 2011). Örnek yüzeylerinin görüntülenmesinin yanı sıra faz, elektrik iletkenlik ve manyetik farklılıklar da saptanabilmektedir. Bu analizle ince film kaplamaların yüzey incelemeleri, organik ve inorganik malzemelerin yüzey incelemeleri yüzey düzgünlüğü, faz farklılıkları, elektrik iletkenlik farklılıkları ve manyetik alan yönü farklılıkları tespit edilebilmektedir.

### 2.4.3. XRD Analizi

X-ışını kırınımı (XRD), kristalin malzemelerin karakterize edilmesi için güçlü ve tahribatsız bir tekniktir. Yapılar, fazlar, tercih edilen kristal yönelimleri (doku) ve ortalama tanecik boyutu, kristallik, gerilme ve kristal defektler gibi diğer yapısal parametreler hakkında bilgi sağlar(Kohli, 2012).

### 2.4.4. Raman Analizi

Raman spektroskopisi karbon materyalleri olan elmas, grafit, karbon nanotüpler, elmas benzeri karbon gibi yapıların karakterizasyonunda kullanılan hızlı ve hasarsız bir metottur (Ferrari ve Robertson, 2004). Özellikle elmas benzeri karbon yapıların bağ yapısını karakterize etmek için kullanılan en iyi yöntemdir.

Raman spektroskopisi, tüm titreşimsel spektroskopik tekniklerle birlikte, bir molekülün fotonlar şeklindeki bir miktar enerji tarafından uyarılmasıyla ortaya çıkar. Bir foton bir moleküle çarptığında, üç olay gerçekleşebilir. Birincisi ışık elastik olarak enerji kaybı olmadan (Rayleigh) yayılabilir, ikincisi enerjinin bir kısmı molekül tarafından titreşim için kullanılabilir, artık enerjiyi daha düşük enerjili bir foton (Raman Stokes) olarak verir veya molekülün titreşim enerjisini gelen fotonun enerjisine ekleyerek daha yüksek enerjili bir foton (Raman anti-Stokes) sağlar.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. KULLANILAN MATERYALLER

Çalışmamızda 100 adet sağ üst kanin braket(Forestadent, MBT prescription) kullanılmıştır. Braketlerin tümü 0.022x0.028 inç oluk genişliğinde olup, 0° tork ve 8° angulasyon değerine sahiptir. Bu braketlerin yarısı (n=50) fiziksel buhar biriktirme (Physical vapor deposition, PVD) yöntemi kullanılarak DLC ile kaplanmıştır. Braketler kaplanmamış (n=50) ve DLC kaplanmış (n=50) braketler olarak iki gruba ayrılmıştır.

Kullanılan teller; 40 adet 0,018 inç paslanmaz çelik, 20 adet 0,018 inç nikel titanyum ve 40 adet 0,019x0,025 inç paslanmaz çelik ark telleridir. Paslanmaz çelik ark tellerinin de yarısı (n=20) PVD yöntemiyle DLC ile kaplanmış yarısı (n=20) ise kaplanmamıştır. Kaplama sisteminin sahip olduğu yüksek sıcaklık nedeniyle nikel titanyum tellerin elastikiyet ve şekil hafıza özellikleri bozulduğu için bu tellere kaplama yapılamamıştır. Toplamda 5 çeşit tel grubu mevcuttur.

Braket ve tellerin birbiriyle oluşturdukları kombinasyonlar sonucu elde edilen numune grupları aşağıdaki gibidir. (Tablo 3.1. , Tablo 3.2. , Tablo 3.3.)

**Tablo 3.1.** 0.018 çelik tel ve braket grupları. SS ifadesi telin ve braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi tel ve braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS
<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC
<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS
<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC



**Tablo 3.2.** 0.019x0.025 çelik tel ve braket grupları. SS ifadesi telin ve braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi tel ve braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

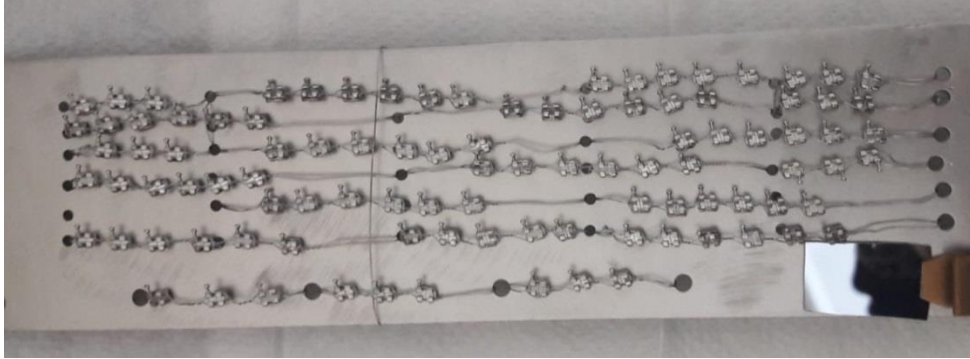
	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>5.grup</b>	0,019x0,025 SS	SS
<b>6.grup</b>	0,019x0,025 SS	DLC
<b>7.grup</b>	0,019x0,025 DLC	SS
<b>8.grup</b>	0,019x0,025 DLC	DLC

**Tablo 3.3.** 0.018 ni-ti tel ve braket grupları SS ifadesi telin ve braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi tel ve braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>9.grup</b>	0,018 Ni-ti	SS
<b>10.grup</b>	0,018 Ni-ti	DLC

### 3.2. NUMUNELERİN KAPLAMA İÇİN HAZIRLANMASI

Braketlerin cihaz içerisine düzgün yerleştirilip kaplanabilmesi için metal plakadan özel bir numune taşıyıcı hazırlanmıştır. Braketlerin kaplanması sırasında karşılaşılan sorun braketlerin yüzeye hem temas edecek hem de kaplanacak yüzeyleri örtmeyecek şekilde taşıyıcıya yerleştirilmesi sorunudur. Bu amaçla braketlerin yerleştirildiği metal taşıyıcının her sırasının başına ve sonuna delikler açılmış, magnetron alanında kalacak şekilde 0.010 paslanmaz çelik tel ligatür braketlerin etrafından geçirilip kaplanması istenen slot kısmını kapatmayacak şekilde sıralı bir düzende taşıyıcıya bağlanmıştır. Şekilde taşıyıcı ve üzerine yerleştirilen braketler görülmektedir. (Resim 3.1.)



**Resim 3.1.** Kaplama ünitesine yerleştirilen braketlerin yerleştirildiği taşıyıcı levha

Tellerin kaplanması için tellerin asılacağı bir taşıyıcı hazırlanmıştır. Burada yüzeylerin gölgelenmemesi ve magnetron karşısına gelmeyen yüzeyin de kaplanabilmesi için numunelerin arkası boş bırakılmıştır. Sıralanma sırasında tellerin birbirine temas etmemesine dikkat edilmiştir.

İnce film kaplama uygulamalarında kaplanacak yüzeyin son hali oldukça önemlidir. Yüzeyde karşılaşılabilecek kirlilikler kaplama sırasında ve sonrasında istenmeyen sonuçlara yol açmaktadır. Bu nedenle kaplanacak numunelerin yüzeyleri mümkün olduğunca temiz olmalıdır. Hazırlanan filmlerin kalitesi ve yapışması doğrudan numune temizliği ile ilgili olduğundan, vakum ortamına girmeden önce bir dizi kimyasal temizlik prosedürü uygulanması gerekmektedir. Numuneler taşıyıcıya yerleşmiş şekilde “Bandelin Sonorex RK 255-H” marka ultrasonik banyoda sırasıyla 15 dakika aseton, 15 dakika alkol ihtiva eden ortamda yıkanmış ardından saf su ile durulanmıştır. Tel numunelerin temizliği de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler hava kurutması ile kaplanmaya hazır hale getirilmiştir.

### 3.3. NUMUNELERİN KAPLANMASI

Numune kaplamaları, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi laboratuvarı bünyesinde kurulu olan manyetik alanda sıçratma kaplama sisteminde gerçekleştirilmiştir. DLC film kaplama Resim 3.2’de gösterilen kapalı alan dengesiz

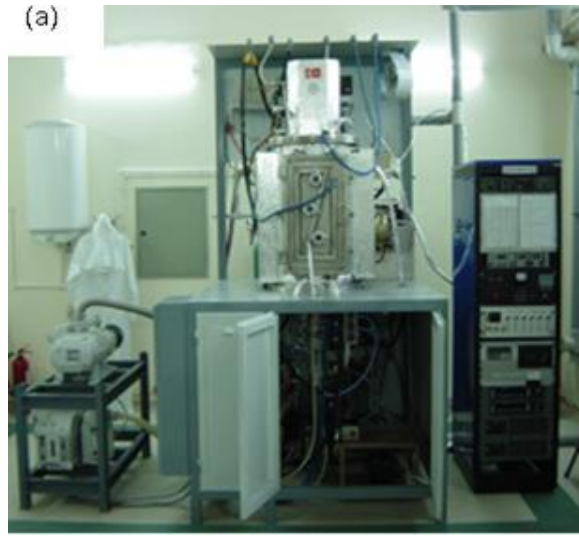
manyetik kaynaklı sıçratma (CFUBMS) sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Sistem 4 magnetrona sahiptir. Uniform ve daha yoğun kaplama oluşturmak için kaplanacak taban malzemeler plazma içerisinde kaplama sırasında dönme hareketine tabi tutulmuştur. Kaplama işlemi adımları aşağıda sırasıyla verilmektedir;

1) Numunelerin ön temizleme işlemlerinden geçirilerek hazırlanması ve vakum odası içerisinde tutuculara yerleştirilmesi. Kaplanacak braket ve teller ile birlikte silisyum yongalar “Bandelin Sonorex RK 255-H” marka ultrasonik banyoda, sırasıyla 15 dakika saf aseton ve 15 dakika da saf etil alkolle yıkanmış ardından saf su ile durularak kurutulmuştur.

2) Yüksek vakumun pompalar vasıtasıyla elde edilmesi(2-2.5 Pa). İstenen vakum değerine ulaştıktan sonra ortama argon (Ar) gazı verilerek ortam çalışma basıncı değerine getirilmiştir.

3) Taban malzeme yüzeyinde etkin temizlemeyi sağlamak için vakum altında 20 dakika iyon temizleme işlemi yapılmıştır.

4) Taban malzeme üzerinde daha iyi yapışma kabiliyeti elde etmek, film ve altlık ara yüzeyinde artık gerilmeleri azaltmak için 5 dakika Ti ara tabaka, 5 dakika TiN ara tabaka ve bu tabakalar üzerine 25 dakika DLC film biriktirilmesi işlemi yapılmıştır. Bu işlemler sırasında kullanılan argon, azot ve asetilen gaz akışları kütle akış metreler vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Kaplama işlemi sırasında taban malzemelere bias voltajı uygulanmıştır(-150 V) , darbeli doğru akım kaynağı 5 A Ti hedef akımı, 150 kHz frekans, 2,5 µs darbe süresi şartlarında çalıştırılmıştır. Kaplanacak parçalar bir elektrik motoru yardımıyla döndürülerek homojen olarak kaplanması sağlanmıştır. Kaplama süresi sona erdiğinde akım ve gerilim kesilerek numuneler soğumaya bırakılmıştır. Kaplama sonrası braketlerin son hali Resim 3.3.’de görülmektedir.



**Resim 3.2.** Manyetik alanda sıçratma kaplama ünitesi



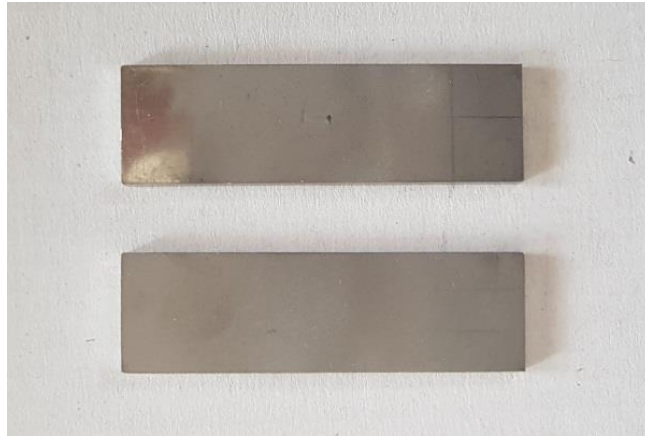
**Resim 3.3.** Kaplama sonrası numunelerin görünümü

### **3.4. TEST DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI VE SÜRTÜNME TESTLERİ**

Dişin ark teli boyunca kaydırılmasının simülasyonu amaçlı Redlich ve arkadaşlarının tanımlamış olduğu sistem çalışmamıza uyarlanmıştır. Redlich ve arkadaşları sürtünmenin test edilebilmesi için Instron cihazına yerleştirilebilecek bir parça tasarlamışlardır (Redlich ve ark., 2003). Bu parça test edilen braketleri taşıyan

alüminyum metal bir çerçeveden oluşmaktadır.(Resim 3.9.) Braketler metal çerçeve üzerine paslanmaz çelik plakalar aracılığıyla bağlanmaktadır.

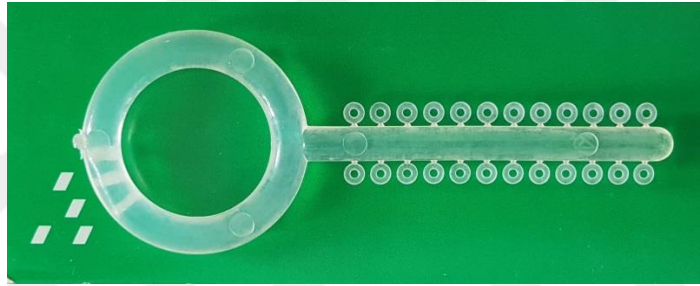
Braketlerin yapıştırılması için, 2 mm kalınlığında 100 adet paslanmaz çelik plaka eşit boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır.(Resim 3.4.) Plakalar her iki ekseninde işaretlenerek braketlerin telin geçeceği orta noktada ve her plakada aynı olmak üzere yerleştiğinden emin olunmuştur. Bu işlemin öncesinde yapıştırılacak bölge dahil olmak üzere plaka yüzeyleri kumlanmıştır. Kumlama işleminin ardından yüzeyler alkol ile temizlenmiştir. Braketler metal plakalara ışıkla sertleşen kompozit ile yapıştırılmıştır. (Resim 3.5.) Ark tellerini braketlere bağlamak için elastomerik ligatür kullanılmıştır.(Resim 3.6. ve Resim 3.8.) Elastik ligatür kullanılmasının nedeni kolay uygulanması ve uygulama esnasında standardizasyonun sağlanabilmesidir. Bu şekilde üzerine braket yapıştırılmış olan paslanmaz çelik plaka alüminyum metal çerçeve üzerine vidalanmış ve sürtünme deneyleri için hazır hale getirilmiştir.(Resim 3.9.)



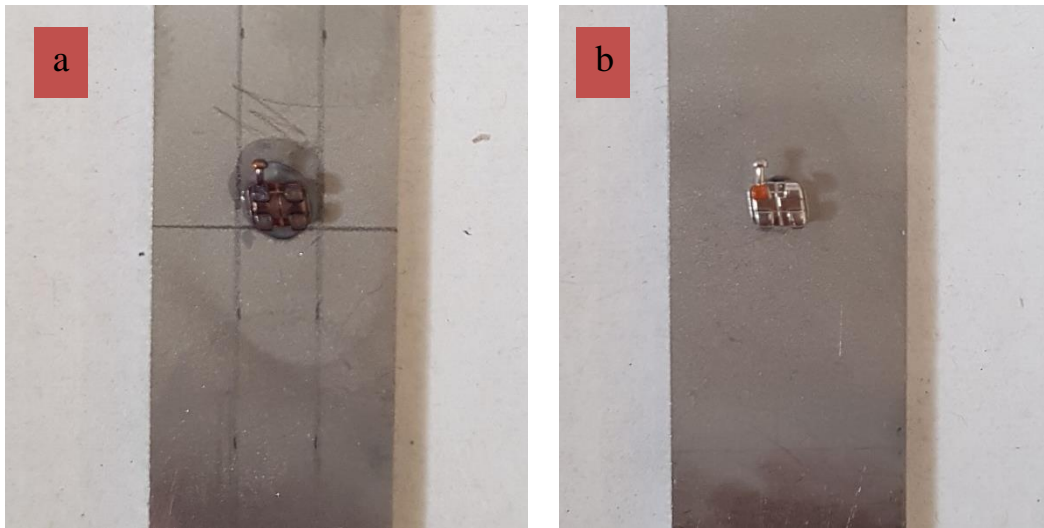
**Resim 3.4.** Braketlerin yapıştırıldığı metal plakalar



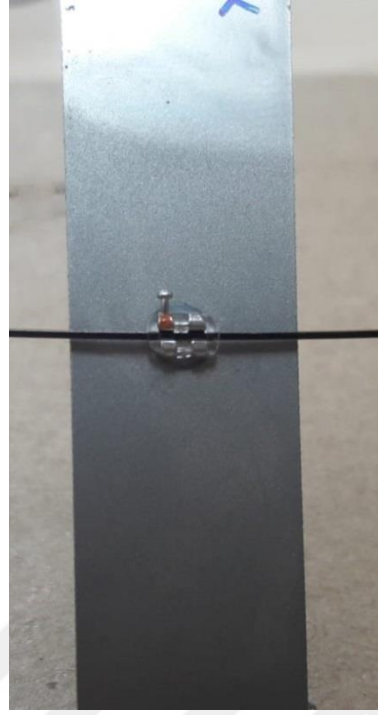
**Resim 3.5.** Kompozit ve bond



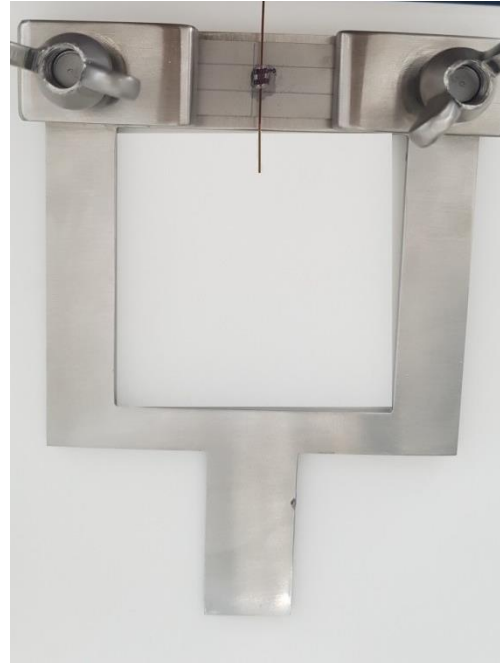
**Resim 3.6.** Elastik ligatür



**Resim 3.7.** Kaplanmış braket(a), kaplanmamış braket(b)



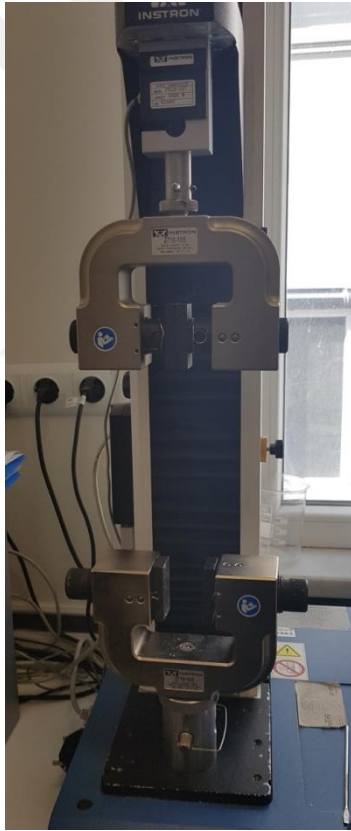
**Resim 3.8.** Braket plakalara yapıştırılmış ve ark teli elastik ligatür ile braketlere bağlanmıştır.



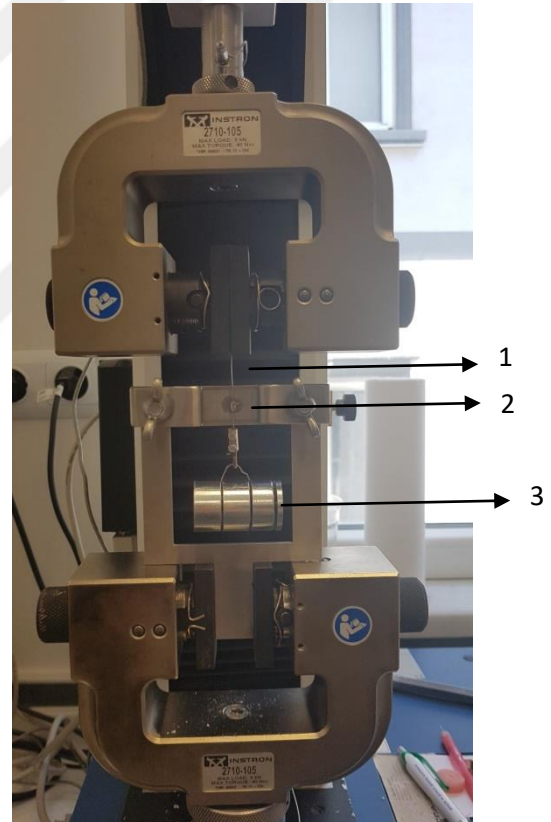
**Resim 3.9.** Taşıyıcı alüminyum çerçeve



Sürtünme testleri 5 kN kapasiteli 2510-105 model İnstron üniversal test cihazında yapılmıştır. (Resim 3.10.) Tasarlanan çerçevenin alt bölümü cihazın alt çenesine bağlanmıştır. Üst çeneye ise testte kullanılacak olan tel sabitlenmiştir. Telin sistemde sabit eksende kalabilmesi için alt ucuna 150 gram ağırlık asılmıştır.(Resim 3.11) Cihaza bağlı olan bilgisayarda ki Bluehill 2 yazılımıyla elde edilen sürtünme değerleri hem grafik olarak hem de ham veri olarak elde edilmiştir. (Resim 3.12.)

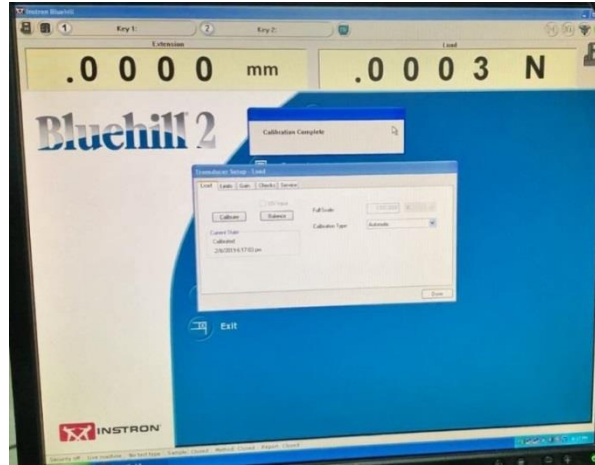


**Resim 3.10.** İnstron test cihazı



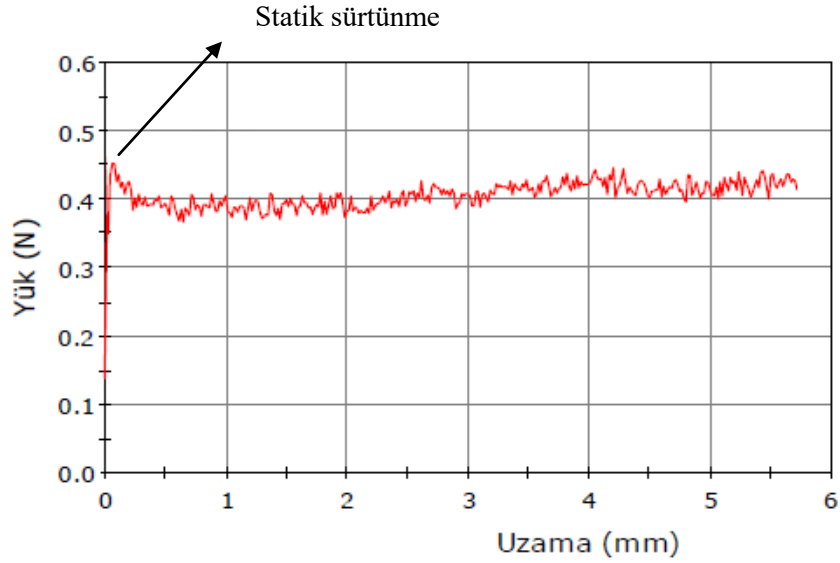
**Resim 3.11.** 1-ark teli, 2-braket, 3-ağırlık





**Resim 3.12.** Verilerin elde edildiği yazılım programı

Sistemin başlatılmasıyla birlikte Kusy ve arkadaşlarının tanımlamış olduğu şekilde ark teli braket içerisinde 10 mm/dk hızla, 5 mm'lik mesafe boyunca çekilmiştir ve hareketi sırasında açığa çıkan statik sürtünme kuvveti gerilim ölçen kuvvet sensörü yardımıyla bağlı olduğu bilgisayara kaydedilmiştir (R. Kusy ve Whitley, 1989). Her test öncesinde tel ve braket sistemden çıkarılmış, cihaz yeniden kalibre edilerek yeni test için yeni tel ve braket yerleştirilmiştir. Güvenilirlik ve testlerin istatistiksel açıdan değerlendirilebilmesi adına her bir braket ark teli kombinasyonu için aynı işlem 10 defa tekrarlanmıştır. Her bir deneyde farklı braket ark teli çifti kullanılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında çekme mesafesine bağlı olarak yük değerleri kaydedilmiş ve telin braket içinde ilk harekete başladığı andaki yük değeri, statik sürtünme kuvveti olarak alınmıştır. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. Uzama-Sürtünme kuvveti grafiği

### 3.5. YÜZEY ANALİZ TESTLERİ

#### 3.5.1. Raman Analizi

Çalışmamızda üretilen kaplamaların elmas benzeri karbon yapılarının karakterizasyonu için HeNe lazeriyle 532 nm dalga boyunda uyarma ışını üreten Witec Alpha M+ Raman cihazı kullanılmıştır. Yapılan her deney için grup içerisindeki bir numune alınarak kaplamanın DLC ile uyumlu olup olmadığı tespit edilmiştir.

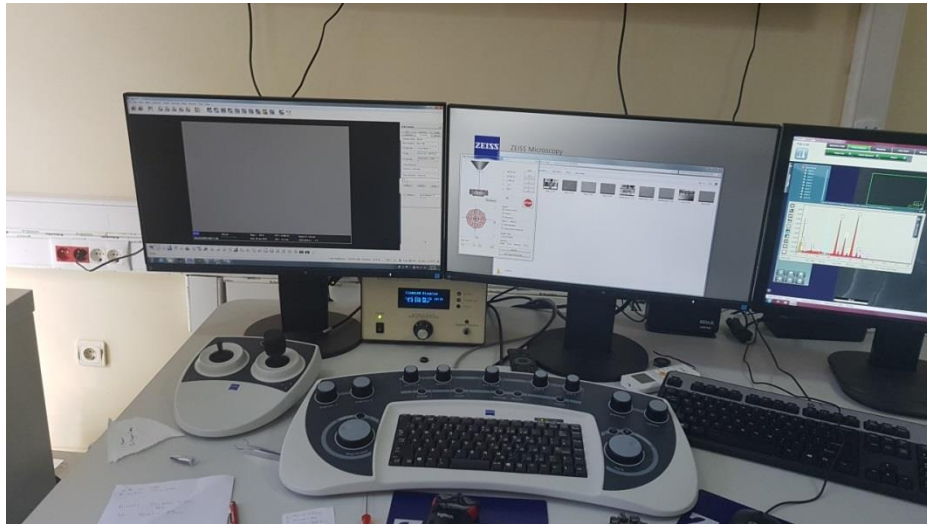
#### 3.5.2. SEM ve XRD Analizi

Yapılan kaplamaların tamamı aynı parametreler ile yapıldığından kaplama kalınlıkları, silisyum yongaların kırık kesitleri SEM'de incelenerek tespit edilmiştir ve numunelerin çeşitli bölgelerinden alınan toplam kaplama kalınlığının ortalaması  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Bu amaçla LEO 440 model bilgisayar kontrollü dijital Sem cihazı

kullanılmıştır. Kaplamadaki elementlerin içerikleri ve element bileşimleri XRD analizi ile tespit edilmiştir. (Resim 3.13.)



**Resim 3.13.** Sem ve XRD Cihazı



**Resim 3.14.** Analizlerin görüntülenmesi

### 3.5.3. AFM Analizi

Kaplama yüzey yapılarının tespit edilmesinde kullanılmıştır. Resim 3.15.'de görülen Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) nun modeli Model: Veeco Multimode 8 dir. AFM Analizi, yüksek çözünürlükte her tür malzeme yüzeyinin (Metal,seramik, polimer) incelenmesini sağlar. Nano ölçekte yüzey pürüzlülüğü, aşınma, kaplama tabaka kalınlığı ölçümü özelliği vardır.



**Resim 3.15.** Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

### 3.6. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Verilerin normal dağılıma uygunluğu histogram, q-q grafikleri ve Shapiro-Wilk testi ile değerlendirilmiştir. Varyans homojenliği Levene testi ile test edilmiştir. Braket ve kaplama açısından yapılan karşılaştırmalarda bağımsız iki örneklem *t* testi uygulanmıştır. Teller arası karşılaştırmalarda tek yönlü varyans analizi kullanılmıştır. Çoklu karşılaştırmalar Tukey testi ile gerçekleştirilmiştir. Veriler ortalama ve standart sapma olarak özetlenmiştir. Verilerin analizi IBM SPSS 22.0 istatistik yazılımında gerçekleştirilmiştir. Anlamlılık değeri  $p < 0.05$  olarak kabul edilmiştir.

## 4. BULGULAR

### 4.1. SÜRTÜNME KUVVETİ İLE İLGİLİ BULGULAR

Ölçülen sürtünme kuvveti değerleri tüm gruplar için tablo 4.1., 4.2. ve 4.3.'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** Sürtünme kuvveti değerleri ortalama  $\pm$  standart sapma olarak ifade edilmiştir.  
(SS:kaplamasız, DLC: kaplamalı)

	TEL	BRAKET	Sürtünme Kuvveti(N)
<b>1.grup</b>	0,18 SS	SS	0.720 $\pm$ 0.043
<b>2.grup</b>	0,18 SS	DLC	0.521 $\pm$ 0.075
<b>3.grup</b>	0,18 DLC	SS	0.631 $\pm$ 0.069
<b>4.grup</b>	0,18 DLC	DLC	0.385 $\pm$ 0.072

**Tablo 4.2.** Sürtünme kuvveti değerleri ortalama  $\pm$  standart sapma olarak ifade edilmiştir.  
(SS:kaplamasız, DLC: kaplamalı)

	TEL	BRAKET	Sürtünme Kuvveti(N)
<b>5.grup</b>	0,019x0,025 SS	SS	1.613 $\pm$ 0.110
<b>6.grup</b>	0,019x0,025 SS	DLC	0.998 $\pm$ 0.164
<b>7.grup</b>	0,019x0,025 DLC	SS	1.181 $\pm$ 0.154
<b>8.grup</b>	0,019x0,025 DLC	DLC	0.763 $\pm$ 0.104

**Tablo 4.3.** Sürtünme kuvveti verileri ortalama  $\pm$  standart sapma olarak ifade edilmiştir.  
(SS:kaplamasız, DLC: kaplamalı)

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>	<b>Sürtünme Kuvveti(N)</b>
<b>9.grup</b>	0,018 Ni-ti	SS	1.296 $\pm$ 0.191
<b>10.grup</b>	0,018 Ni-ti	DLC	0.865 $\pm$ 0.149

Bulgularımızın ilk kısmını 0,018 ss tel ve braket gruplarının verileri oluşturmaktadır. Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0.018 çelik tellerde (1.grup), sürtünme kuvveti ortalamaları (0,720 $\pm$ 0,043N), kaplama olan braket ile kaplama olmayan tellerin(2.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.521 $\pm$ 0.075)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.4.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0.018 çelik tellerde (1.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0,720 $\pm$ 0,043N), kaplama olan tel ile kaplama olmayan braketlerin(3.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.631 $\pm$ 0.069)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p=0,025) (Tablo 4.4.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0.018 çelik tellerde (1.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0,720 $\pm$ 0,043N), kaplama olan tel ile kaplama olan braketlerin(4.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.385 $\pm$ 0.072)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. (p<0,001) (Tablo 4.4.)

Kaplama olan braketler ile kaplama olmayan 0.018 çelik tellerde (2.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.521 $\pm$ 0.075), 1. ve 3. Grupların sürtünme kuvvetlerinden anlamlı derecede düşük(p<0,001; p=0,004), 4.grubun sürtünme kuvvetinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.5.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olan 0.018 çelik tellerde (3.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.631 $\pm$ 0.069), 1. grubun sürtünme kuvvetinden anlamlı

derecede düşük ( $p=0.025$ ), 2. ve 4.grubun sürtünme kuvvetlerinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. ( $p=0,004$ ;  $p<0,001$ ) (Tablo 4.6.)

Kaplama olan braketler ile kaplama olan 0.018 çelik tellerde (4.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları ( $0.385\pm 0.072$ ), diğer tüm grupların sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı derecede düşük bulunmuştur. ( $p<0,001$ ) (Tablo 4.7.)

**Tablo 4.4.** Kaplamasız braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS	0.720±0.043	<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC	0.521±0.075	<0,001
				<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS	0.631±0.069	=0.025
				<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC	0.385±0.072	<0,001

**Tablo 4.5.** Kaplamalı braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

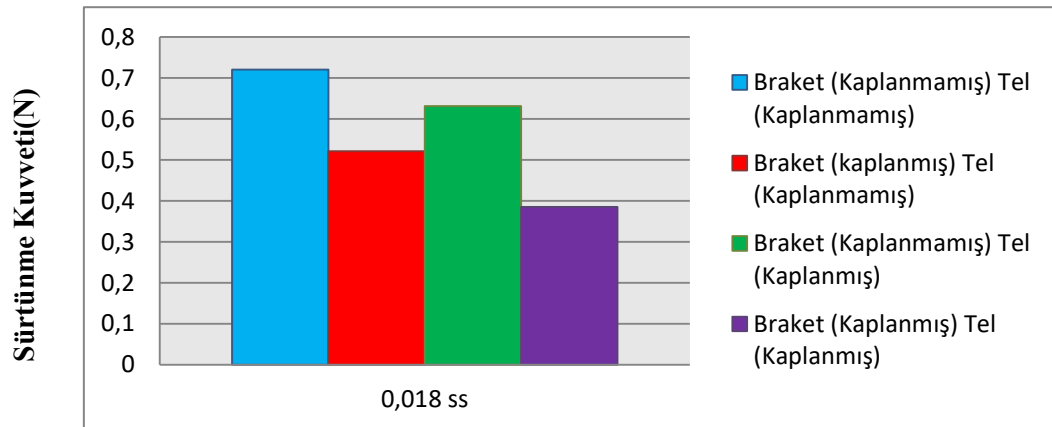
	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC	0.521±0.075	<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS	0.720±0.043	<0,001
				<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS	0.631±0.069	=0.004
				<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC	0.385±0.072	<0,001

**Tablo 4.5.** Kaplamasız braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	p
<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS	0.631±0.069	<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS	0.720±0.043	=0.025
				<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC	0.521±0.075	=0.004
				<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC	0.385±0.072	<0,001

**Tablo 4.6.** Kaplamalı braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	p
<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC	0.385±0.072	<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS	0.720±0.043	<0,001
				<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC	0.521±0.075	<0,001
				<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS	0.631±0.069	<0,001

**Şekil 4.1.** 0,018 SS tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği



Bulgularımızın ikinci kısmını 0,019x0,025 ss tel ve braket gruplarının verileri oluşturmaktadır. Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0,019x0,025 çelik tellerde (5.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (1.613±0.110), kaplama olan braket ile kaplama olmayan tellerin(6.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.998±0.164)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.8.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0,019x0,025 çelik tellerde (5.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (1.613±0.110), kaplama olmayan braket ile kaplama olan tellerin (7.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (1.181±0.154)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.8.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olmayan 0,019x0,025 çelik tellerde (5.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (1.613±0.110), kaplama olan braket ile kaplama olan tellerin (8.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.763±0.104)'ndan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.8.)

Kaplama olan braketler ile kaplama olmayan 0,019x0,025 çelik tellerde (6.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.998±0.164) olup, 5. ve 7. Grupların sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı derecede düşük (p<0,001; p=0,024), 8.grubun sürtünme kuvvetinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. (p=0,002) (Tablo 4.9.)

Kaplama olmayan braketler ile kaplama olan 0,019x0,025 çelik tellerde (7.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (1.181±0.154) olup, 5. grubun sürtünme kuvveti değerinden anlamlı derecede düşük (p<0,001), 6. ve 8. grubun sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. (p=0,024; p<0,001) (Tablo 4.10.)

Kaplama olan braketler ile kaplama olan 0,019x0,025 çelik tellerde (8.grup) sürtünme kuvveti ortalamaları (0.763±0.104) olup, diğer tüm grupların sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı derecede düşük bulunmuştur.(p<0,001) (Tablo 4.11.)

**Tablo 4.7.** Kaplamasız braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>5.grup</b>	19x25 SS	SS	1.613±0.110	<b>6.grup</b>	19x25 SS	DLC	0.998±0.164	<0,001
				<b>7.grup</b>	19x25 DLC	SS	1.181±0.154	<0,001
				<b>8.grup</b>	19x25 DLC	DLC	0.763±0.104	<0,001

**Tablo 4.8.** Kaplamalı braket-kaplamasız tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

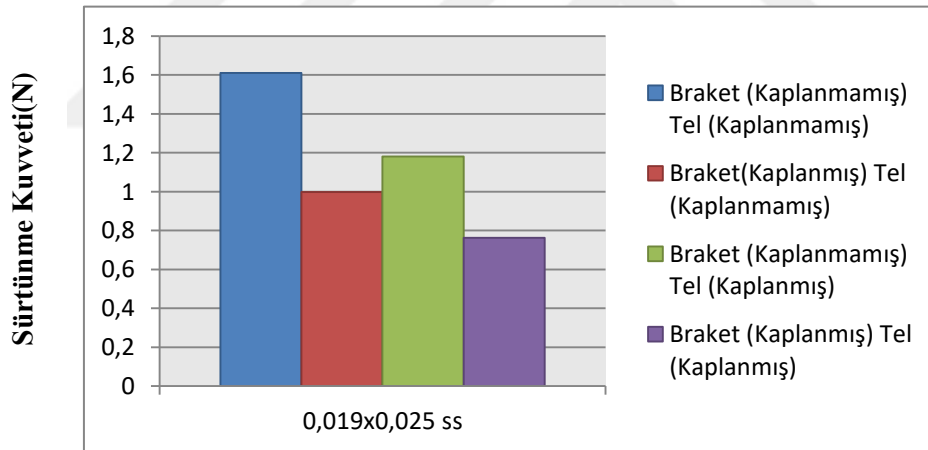
	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>6.grup</b>	19x25 SS	DLC	0.998±0.164	<b>5.grup</b>	19x25 SS	SS	1.613±0.110	<0,001
				<b>7.grup</b>	19x25 DLC	SS	1.181±0.154	=0.024
				<b>8.grup</b>	19x25 DLC	DLC	0.763±0.104	=0.002

**Tablo 4.9.** Kaplamasız braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>7.grup</b>	19x25 DLC	SS	1.181±0.154	<b>5.grup</b>	19x25 SS	SS	1.613±0.110	<0,001
				<b>6.grup</b>	19x25 SS	DLC	0.998±0.164	=0.024
				<b>8.grup</b>	19x25 DLC	DLC	0.763±0.104	<0,001

**Tablo 4.10.** Kaplamalı braket-kaplamalı tel grubunun diğer gruplarla karşılaştırılması

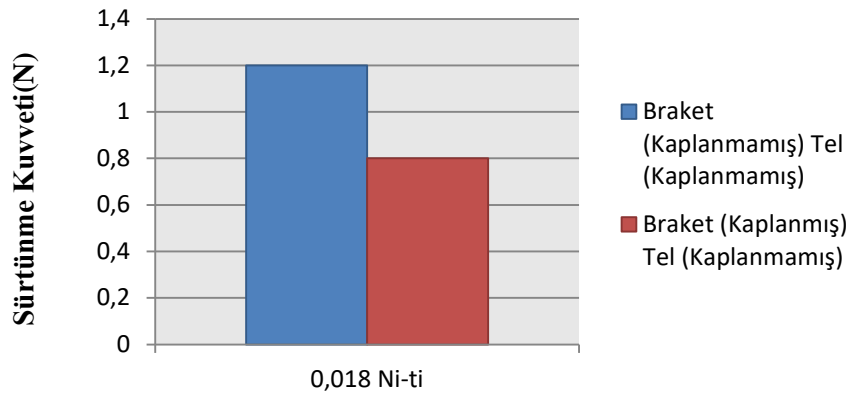
	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	p
<b>8.grup</b>	19x25 DLC	DLC	0.763±0.104	<b>5.grup</b>	19x25 SS	SS	1.613±0.110	<0,001
				<b>6.grup</b>	19x25 SS	DLC	0.998±0.164	=0.002
				<b>7.grup</b>	19x25 DLC	SS	1.181±0.154	<0,001

**Şekil 4.2.** 0,019x0,025 ss tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği

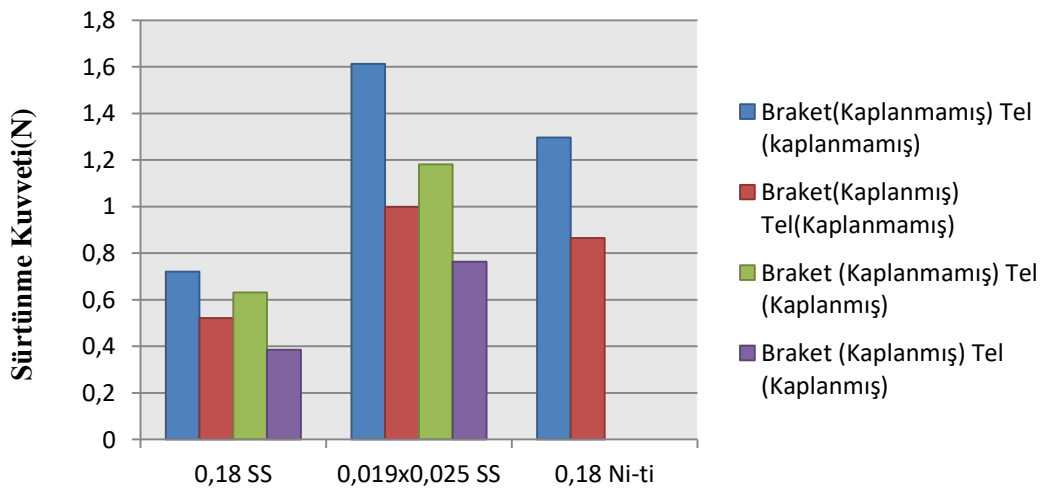
0,018 niti telin kaplamasız braketle oluşturduğu sürtünme kuvveti ( $1.296 \pm 0.191$ ) N olup, aynı telin kaplamalı braketle oluşturduğu sürtünme kuvveti değerinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. ( $p < 0,001$ ) (Tablo 4.12.) Kaplamasız ve kaplamalı tellerin braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetindeki değişimler şekil 4.5 ve şekil 4.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 4.11.** 0,018 Ni-ti telin kaplamalı ve kaplamasız braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetlerinin karşılaştırılması

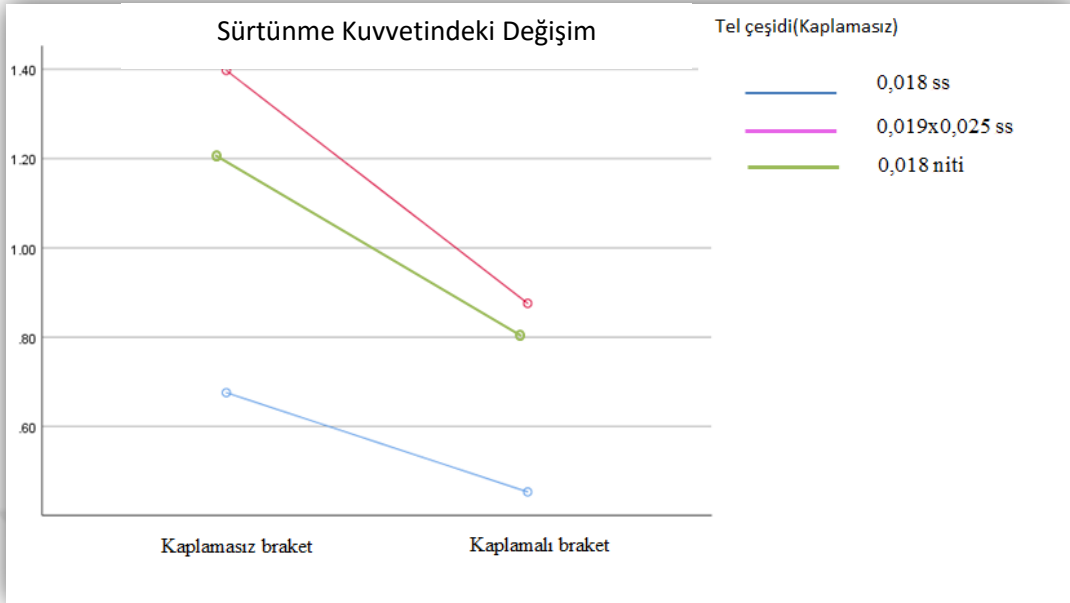
	Tel	Braket	Sürtünme Kuvveti(N)		Tel	Braket	Sürtünme kuvveti(N)	P
<b>9.grup</b>	0,18 Ni-ti	SS	1.296±0.191	<b>10.grup</b>	0,18 Ni-ti	DLC	0.865±0.149	<0,001



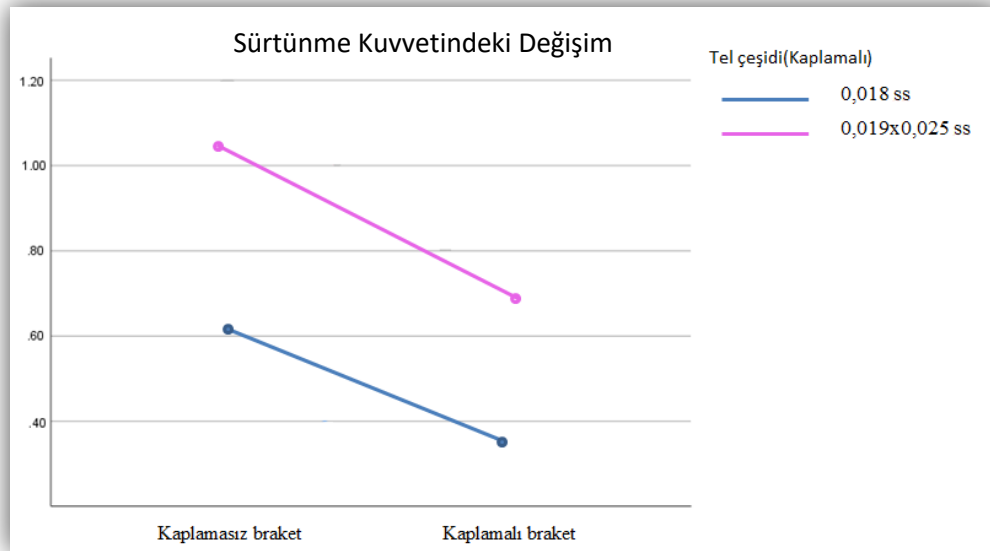
**Şekil 4.3.** 0,018 ni-ti tel ve braket gruplarının oluşturdukları sürtünme kuvvetleri grafiği



**Şekil 4.4.** Bütün grupların sürtünme değerleri grafiği



**Şekil 4.5.** Kaplamasız tellerin kaplamalı ve kaplamasız braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetindeki değişim grafiği

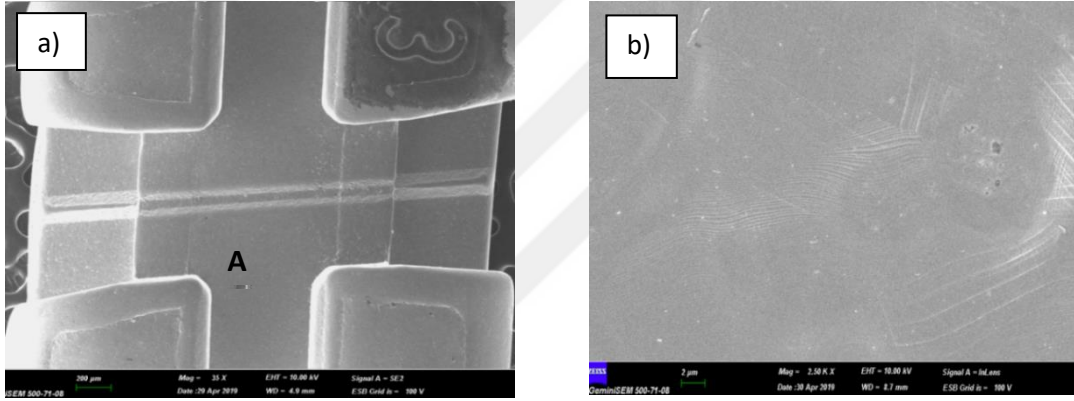


**Şekil 4.6.** Kaplamalı tellerin kaplamalı ve kaplamasız braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetindeki değişim grafiği

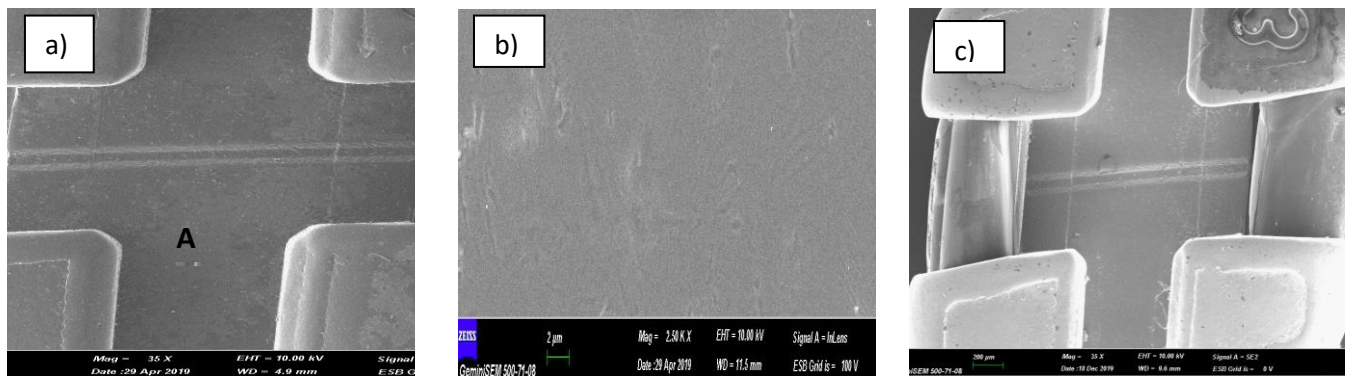
## 4.2. YÜZEY ANALİZLERİ İLE İLGİLİ BULGULAR

### 4.2.1. SEM Analizi Bulguları

Kaplamasız ve kaplamalı braketlere ait SEM analizinde elde edilen görüntüler Resim 4.1. ve 4.2.'de görülmektedir. Kaplamalı braket slotunun SEM görüntüsünde kaplamanın homojen dağılım gösterdiği ve herhangi bir yapışma problemi olmadığı görülmektedir. Kaplamasız braketin yüzeyinde pek çok çizikler ve düzensizlikler gözlenirken kaplamalı braket yüzeyinde bu yapılar görülmemektedir. (Resim 4.1. , Resim 4.2.)



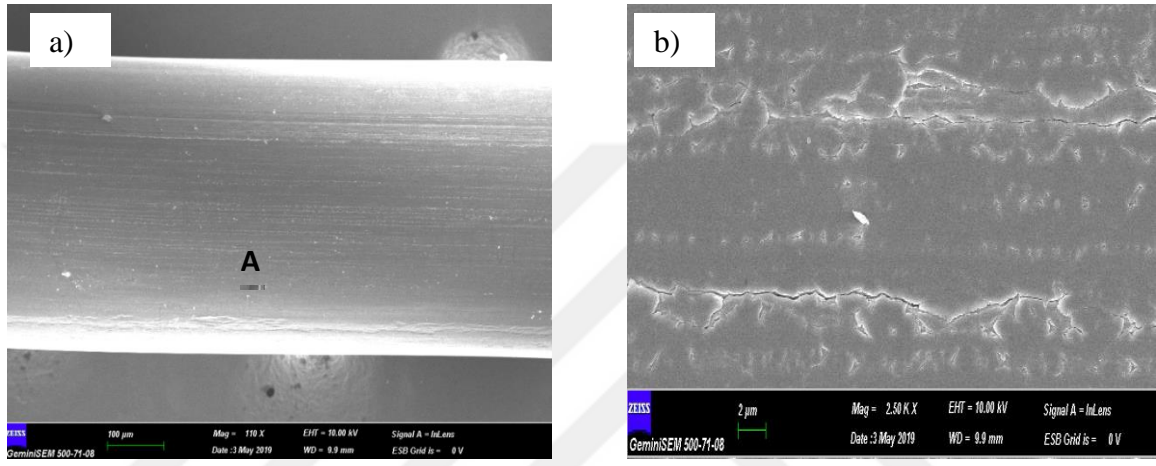
**Resim 4.1.** a) Kaplamasız braketin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü



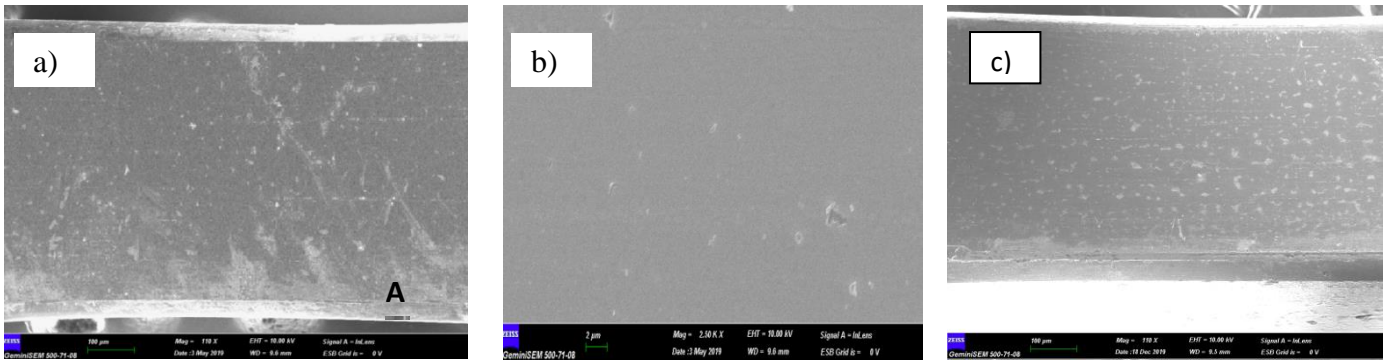
**Resim 4.2.** a) Kaplamalı braketin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü

c) Sürtünme testlerinden sonra kaplamalı braketten alınan SEM görüntüsü

Kaplamasız ve kaplamalı tellere ait SEM görüntüleri Resim 4.3. ve Resim 4.4.'de görülmektedir. Sem fotoğraflarına ve AFM sonuçlarına göre paslanmaz çelik tellerde kaplama öncesi ve sonrası pürüzlülük değerlerinde fazla bir değişim gözlemlenmemiştir.



**Resim 4.3** a) Kaplamasız SS ark telinin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü

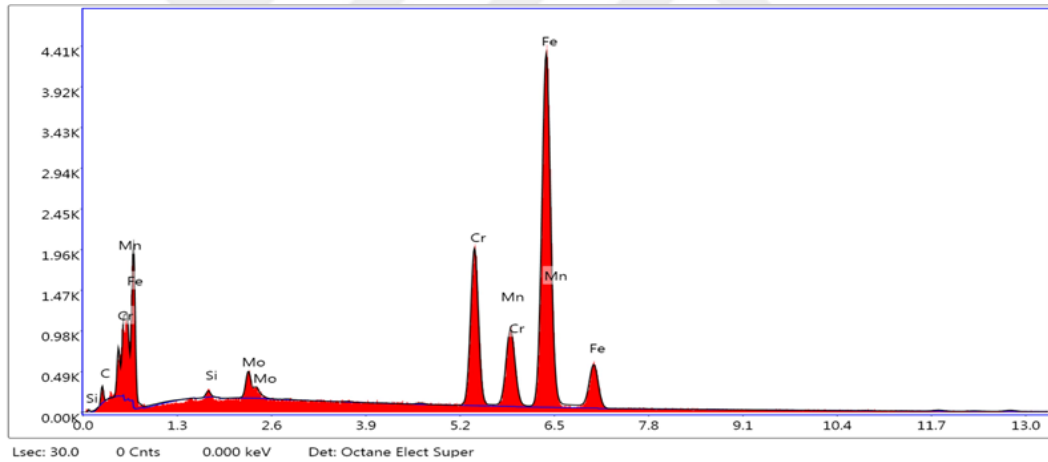


**Resim 4.4.** a) Kaplamalı SS ark telinin SEM görüntüsü, b) a'daki A noktasının SEM görüntüsü

c) Sürtünme testlerinden sonra kaplamalı telden alınan SEM görüntüsü

#### 4.2.2. EDX Analizi, Kaplama Bileşimleri ve Faz Yapıları

DLC kaplamaların % atomik bileşimleri, braket ve teller üzerinde EDX yöntemiyle, 20.00 kV voltaj değerinde ölçülmüştür. Kaplamasız braket ve tellerin bileşimleri de EDX yöntemiyle belirlenmiş olup sonuçlar mukayese edilmiştir. Braketler için kaplamasız ve DLC kaplamalı sonuçlar sırasıyla Şekil 4.7. ve Şekil 4.8’de görülmektedir. Paslanmaz çelik ark telleri için de kaplamasız ve DLC kaplamalı sonuçlar sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10.’da görülmektedir. Ark teli ve braketlerde kullanılan paslanmaz çelik malzeme bileşimlerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Kaplamalı numunelerde Ti, N ve C atomik bileşimleri, EDX analizlerinde tespit edilmiştir. (Tablo 4.14. ve Tablo 4.16.) Braket ve ark teline uygulanan DLC kaplamadan elde edilen EDX analizleri ve elementel bileşim değerleri kaplamanın varlığını ortaya koymaktadır.

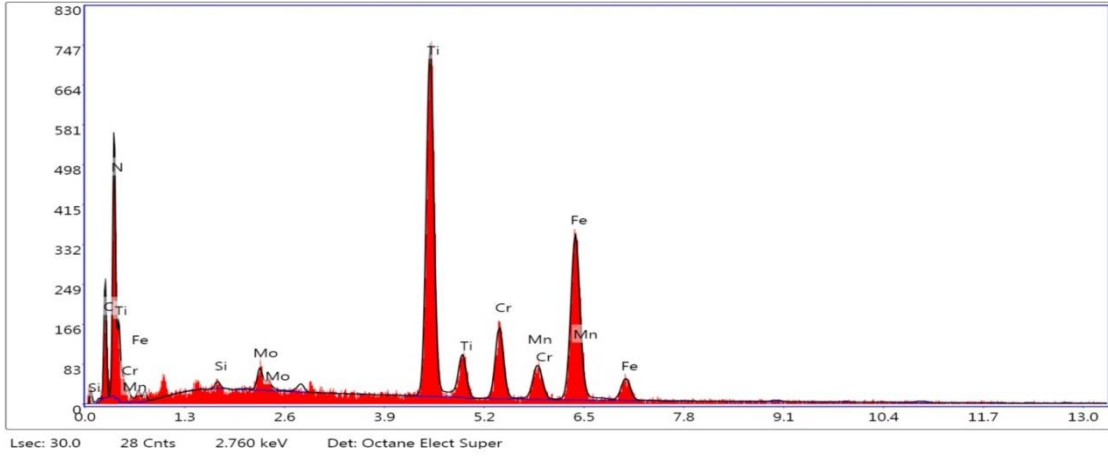


Şekil 4.7. Resim 4.1.’deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamasız braket)

Tablo 4.13. Resim 4.1.’deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi

Element	% Ağırlık	% Atomik
C	3,25	13,42
Si	0,35	0,62
Cr	19,19	18,3
Mn	9,07	8,19
MoL	2,7	1,4
Fe	65,43	58,07

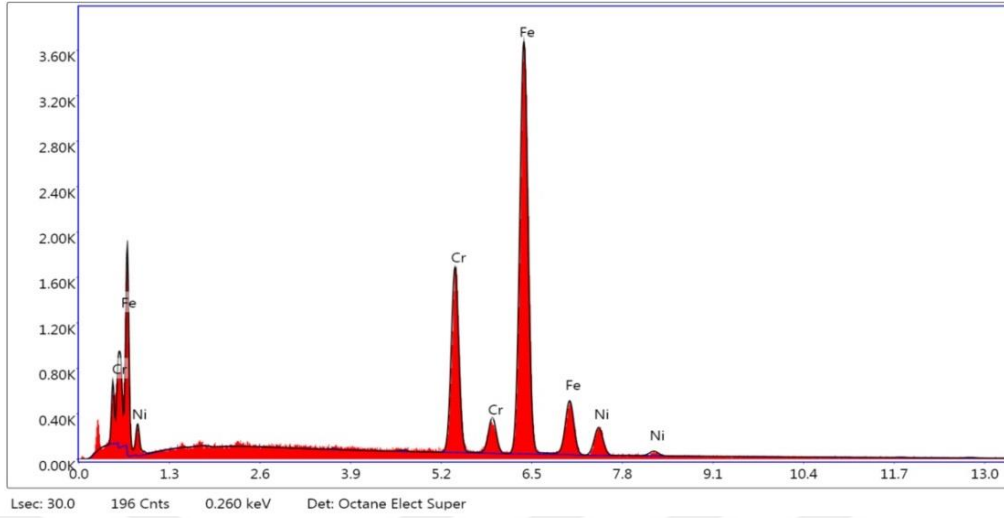




**Şekil 4.8.** Resim 4.2.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamalı braket)

**Tablo 4.14.** Resim 4.2.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi

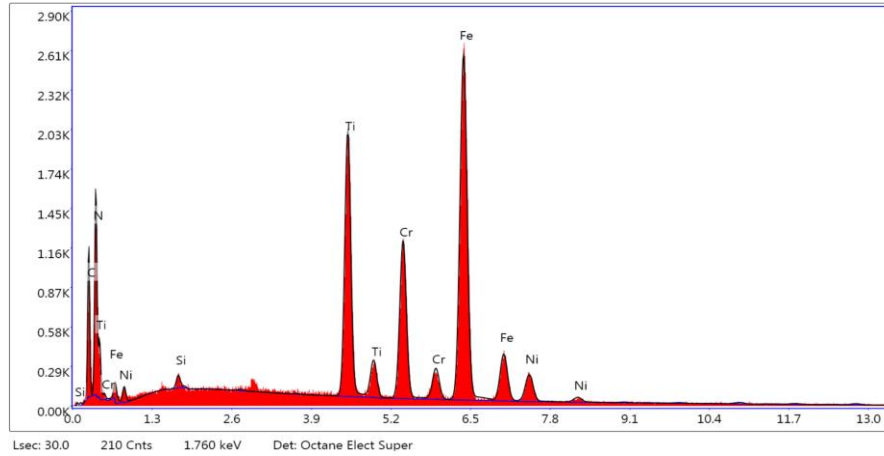
Element	% Ağırlık	% Atomik
C	12,67	29,11
★ N	17,11	33,71
Si	0,27	0,27
★ Ti	28,52	16,44
Cr	8,43	4,48
Mn	3,66	1,84
MoL	1,72	0,49
Fe	27,63	13,66



**Şekil 4.9.** Resim 4.3.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları(Kaplamasız tel)

**Tablo 4.15.** Resim 4.3.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi

Element	% Ağırlık	% Atomik
C	6,43	23,99
Cr	19,82	17,08
Ni	6,64	5,07
Fe	67,11	53,86



**Şekil 4.10.** Resim 4.4.'deki A noktasının EDX analiz sonuçları (Kaplama tel)

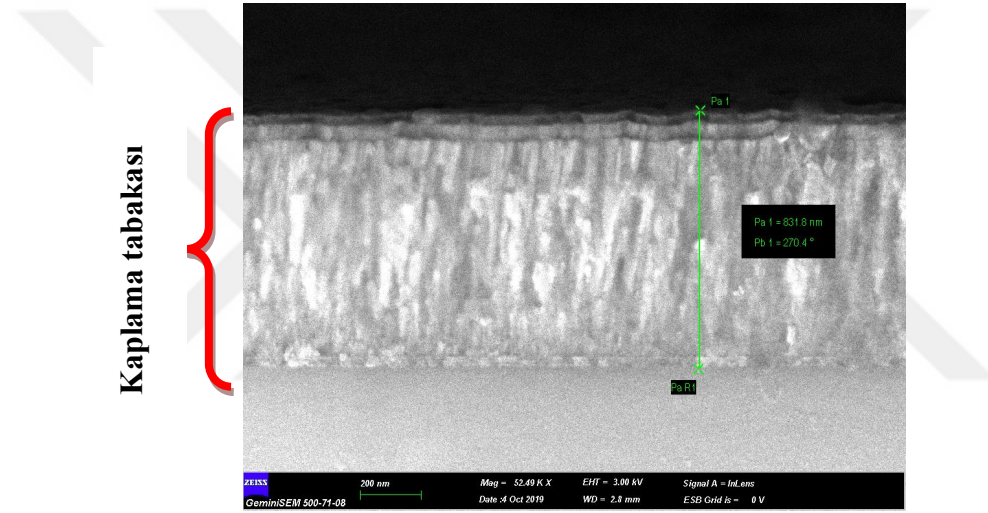
**Tablo 4.16.** Resim 4.4.'deki A noktasının EDX analizinin elementel bileşimi (Kaplama tel)

Element	% Ağırlık	% Atomik
C	13,81	33,92
★ N	11,81	24,86
★ Ti	15,35	9,45
Cr	12,91	7,33
★ Si	0,36	0,38
NiL	4,5	2,26
Fe	41,25	21,79

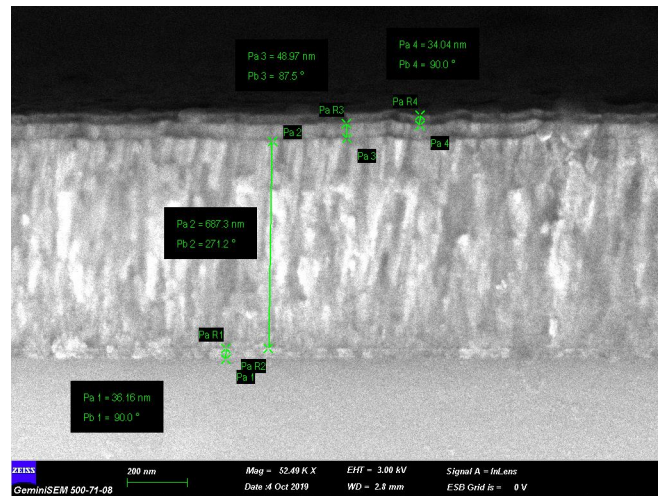
### 4.2.3. Kaplama Karakterizasyonu

Kaplama kalınlıkları, silisyum yongaların kırık kesitleri SEM'de incelenerek tespit edilmiştir. Elmas kesici yardımı ile çizildikten sonra kırılan, kaplanmış silisyum yonga kesit SEM görüntüleri Resim 4.5.'de görülmektedir. Fotoğraflardan, kaplama kalınlıklarının kesit boyunca homojen olduğu ve kaplamaların çok tabakalı bir yapıya sahip oldukları görülebilir. Kaplamaların düzgün bir yüzey yapısı ve düşük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip oldukları görülmekte olup AFM ölçüleriyle de ortaya

konulmuştur. Çalışmamızda ark teli, braketler ve silisyum yongalar üzerine DLC kaplama yapılırken öncelikle yapışmayı artırmak için Ti ara tabaka onun üzerine TiN (titanyum nitrür) katmanı oluşturulmuş, son yüzeyde ise DLC katmanı oluşturularak yüzeyin sürtünme katsayısının azaltılması amaçlanmıştır. Silisyum yonga üzerinde yapılan kaplama kalınlığı taramasında, her kaplama tabakasının homojen kalınlığa ve sütünsal bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Kaplama tabaka kalınlıkları nano mertebede sırasıyla 36.16 nm, 687 nm, 83 nm olarak tespit edilmiştir. Çalışmamızda elde edilen kaplama kalınlığı toplamda 832 nanometredir(0,83µm). (Resim 4.6.)



**Resim 4.5.** 53 KX büyütme yapılmış DLC kaplamalı Si numunesine ait kırık kesit SEM görüntüsü



**Resim 4.6.** 100 KX Büyütme DLC kaplamalı Si numunesine ait kırık kesit SEM görüntüsü ve kaplama kalınlığı.

#### 4.2.4. Kaplama Sertlikleri ve Yüzey Pürüzlülükleri

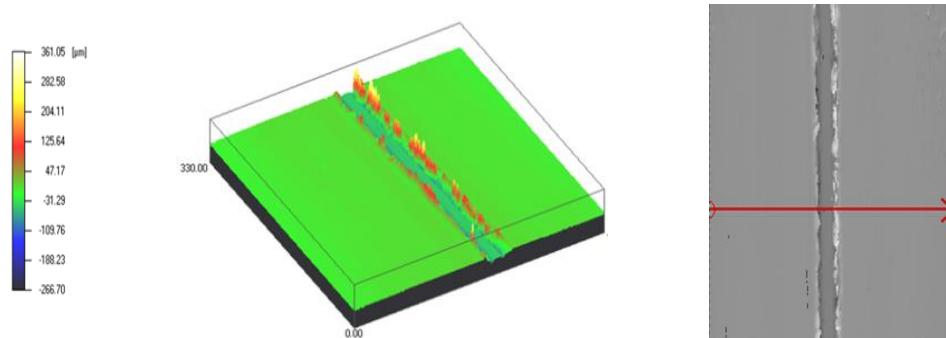
Kaplamasız paslanmaz çelik tellerin ve DLC kaplamalı paslanmaz çelik tellerin sertlikleri CSEM nano-sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, kare tabanlı elmas Vickers ucu ( $\alpha=136^\circ$ ) ile Oliver-Pharr metoduna uygun olarak silisyum yongalar ve ark telleri üzerinden ölçülmüştür. CSEM nano-sertlik test cihazı, ince kaplamaların sertliklerini ve mekanik özelliklerini taban malzemesinden bağımsız olarak çok düşük batma derinliklerinde ölçülebilmesini sağlayan bilgisayar kontrollü bir cihazdır. Maksimum 300mN yükleme kapasitesi olup, uygulanan yük ile nanometre mertebesindeki batma derinliğinin yüke bağlı değişim grafiğini çizerek, kullanılan Vickers veya Berkovich ucun temas alanına göre kaplamanın sertlik değerini otomatik olarak hesaplar. Taban malzemesinden kaynaklanabilecek etkileri ortadan kaldırmak amacı ile batma derinliği kaplama kalınlığının yaklaşık %10'unu geçmeyecek şekilde yük seçilmiştir. CSEM Instruments marka nanosertlik test cihazı ile kare tabanlı elmas Vickers ucu kullanılarak her numuneden yedi adet ölçüm yapılmış ve sertlik değerleri Oliver ve Pharr analiz metodu ile tespit edilmiştir. Nano-sertlik ölçüm sonuçlarına göre kaplamasız tellerin sertlikleri ortalama 11,6 GPa iken kaplamalı tellerde DLC tabaka sertliği ortalama 15,66 GPa, TiN tabaka sertliği ortalama 24,07 GPa hesaplanmıştır. Kaplama sonrası ark tellerinin sertlik değerinde artış sağlanmıştır.

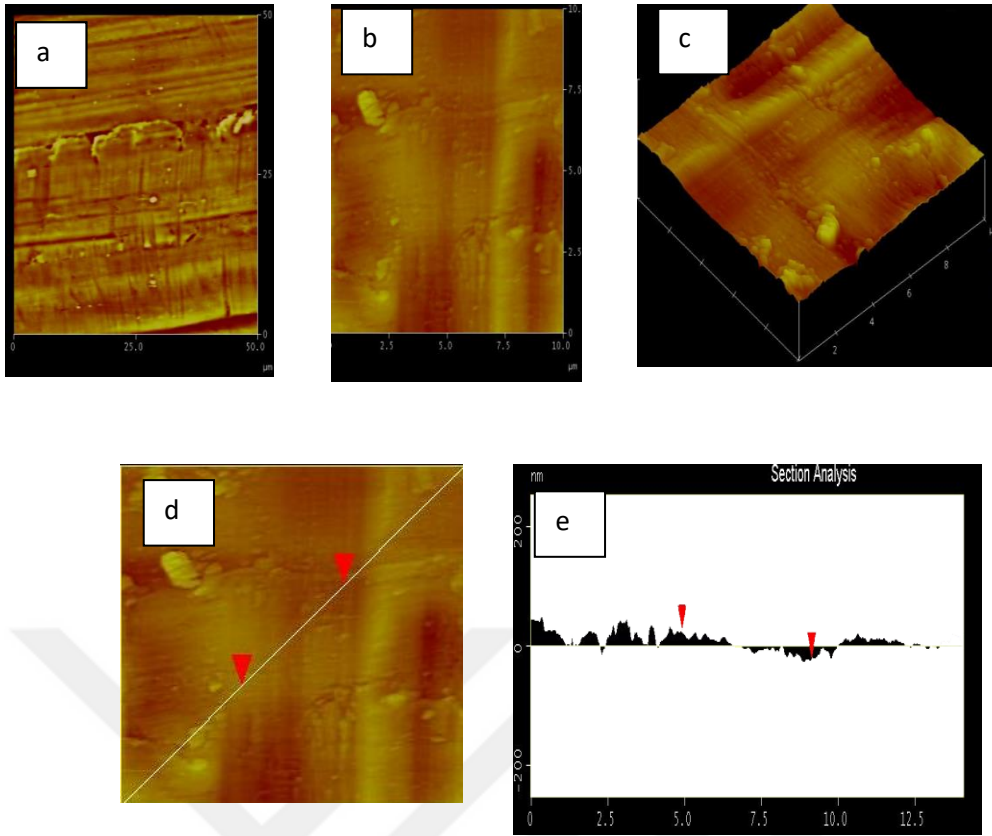
DLC kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, "Mitutoyo SurfTest" marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ark telleri üzerinden ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülükleri Tablo 4.17'de verilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, farklı yerden alınan 4 ölçüm sonucunun ortalaması olup,  $R_a$  cinsinden yüzey pürüzlülükleri 0,05 ile 0,07  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde, kaplama parametrelerine göre çok belirgin bir farklılığın gözlenmemesi, ölçüm yönteminin hassasiyetinden kaynaklanmıştır. Kaplamasız ve DLC kaplamalı ark tellerinin üç boyutlu yüzey yapıları, AFM analiz tekniği ile de incelenmiş olup AFM analizleri kaplamasız ark teli için Resim 4.7.'de kaplamalı ark teli için Resim 4.8.'de verilmektedir. AFM analizlerinden ayrıca kaplamaların gözeneksiz ve mikro-çatlaksız bir yüzey yapısına sahip olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.17.** Kaplamasız ve kaplamalı tellerin yüzey pürüzlülükleri.

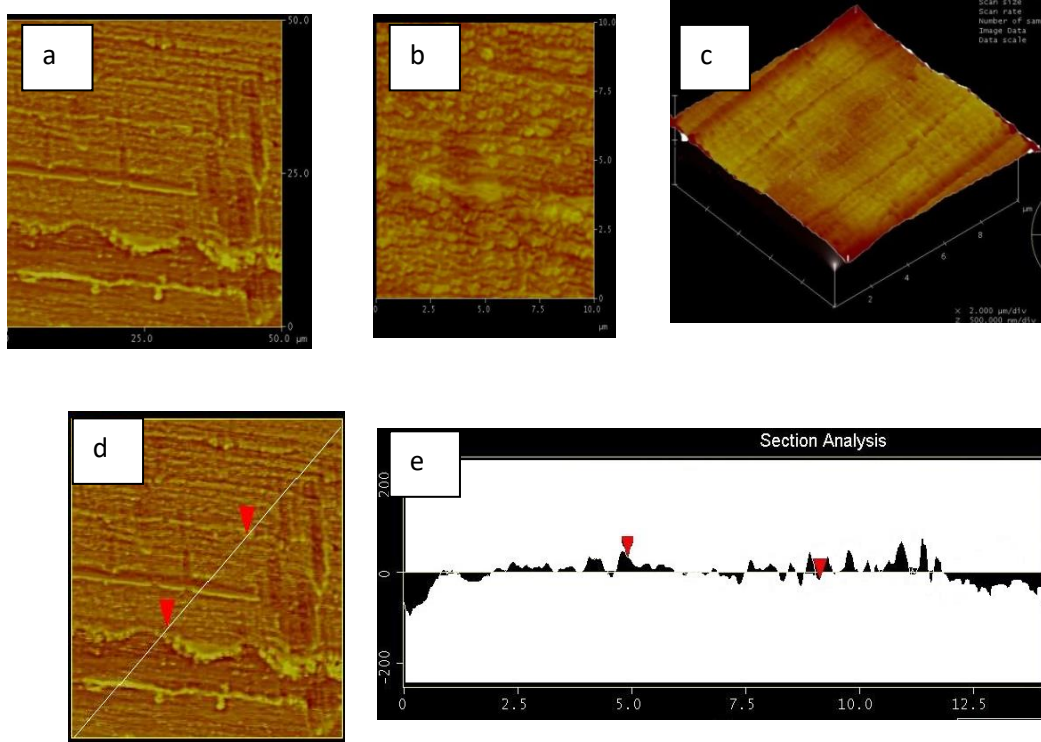
Tel	Yüzey Pürüzlülüğü $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )				Ortalama $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	
0,018 SS kaplamasız	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,018 SS kaplamalı	0,08	0,05	0,09	0,07	0,072
0,019x0,025 SS kaplamasız	0,05	0,05	0,06	0,06	0,055
0,019x0,025 SS kaplamalı	0,05	0,07	0,04	0,07	0,057

Braket slot kanallarında pürüzlülük ölçümü temassız optik profilometre ile yapılmış ve ölçüm sırasında braket üretiminden kaynaklı orta bölgede mevcut olan yiv boyunca işleme hatası olduğu görülmüştür. Bu da pürüzlülüğün artmasına neden olmaktadır. Kaplamasız brakette pürüzlülük değeri yiv etrafındaki farklı bölgelerden alınan 4 ölçüm sonucunun ortalaması olup 11,47  $\mu\text{m}$  iken kaplamalı brakette ölçülen ortalama pürüzlülük değeri 8.034  $\mu\text{m}$ ' ye düşmüştür. Kaplamalı braketlerde kanal dışından yapılan ölçümlerde ise pürüzlülük değerinin oldukça düştüğü görülmüş ortalama pürüzlülük 0.652  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

**Resim 4.6.** Braket slot pürüzlülükleri



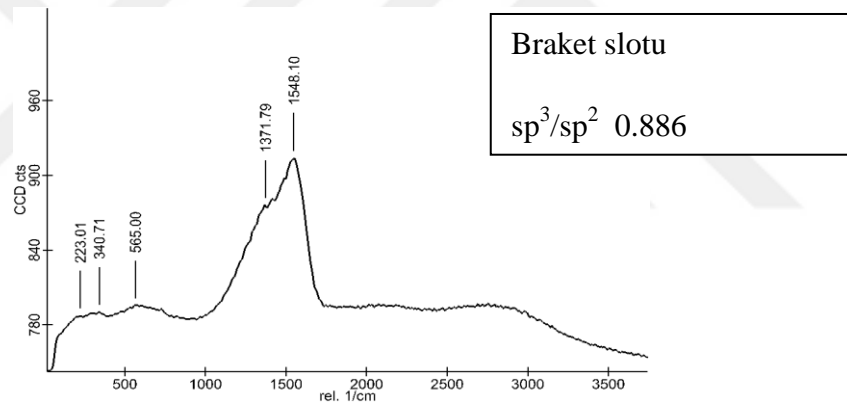
**Resim 4.7.** Kaplamasız ark telinin AFM Analizi a) 50 µm tarama alanında yüzey, b) 10 µm tarama alanında yüzey, c) üç boyutlu yüzey yapıları, d) pürüzlülük sahası, e) pürüzlülük sahasında değişim.



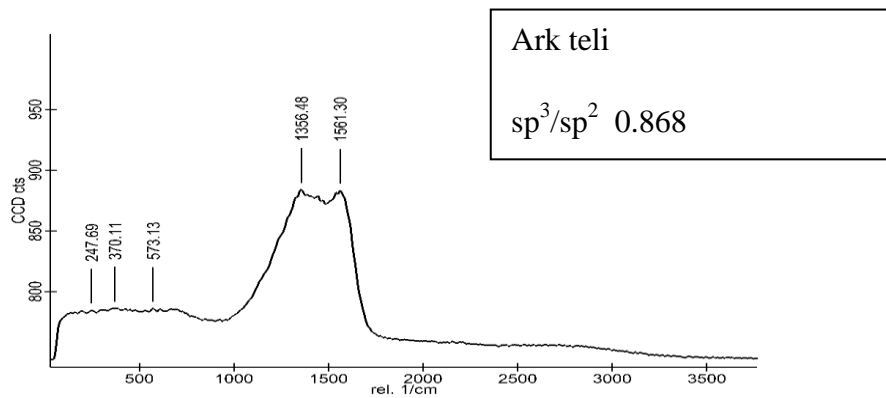
**Resim 4.8.** Kaplamalı ark telinin AFM Analizi a) 50 µm tarama alanında yüzey, b) 10 µm tarama alanında yüzey, c) üç boyutlu yüzey yapıları, d) pürüzlülük sahası, e) pürüzlülük sahasında değişim

#### 4.2.5.Raman Analizinin Değerlendirilmesi

Raman spektroskopisinden elde ettiğimiz grafiklerde elmas benzeri karbonun karakteristik eğrisi elde edilmiştir. Farklı parametrelerde hazırlanan DLC filmlerin yapısındaki grafit-elmas hacim oranını( $sp^3/sp^2$ ) tespit etmek için Raman spektroskopisi ile filmlerin bağ yapıları incelenmiştir.  $1548\text{ cm}^{-1}$  de olan G piki grafit yapıya ait iken,  $1371\text{ cm}^{-1}$  de olan D piki ise grafitin düzensizliğinin ifadesidir ve elmas yapıya aittir.(Şekil 4.11.) Birçok düzensiz karbon yapı bu D ve G pikleri tarafından tanımlanmaktadır. Bu pikler elde edilen kaplamanın karbon içeriğe sahip olduğunu göstermektedir. DLC film içindeki büyük ve düzenli  $sp^2$  kümeleri, filmin elmas benzeri özelliklerini azaltır. Yani yapı içerisindeki  $sp^3/sp^2$  oranı ne kadar büyük ise, filmin elmas benzeri özellikleri o kadar fazladır. (Şekil 4.11., Şekil 4.12.)



Şekil 4.11. Kaplamalı Braket Numunesinin Raman spektroskopisindeki görüntüsü (Raman shift,  $\text{cm}^{-1}$ )



Şekil 4.12. Kaplamalı Tel Numunesinin Raman spektroskopisindeki görüntüsü (Raman shift,  $\text{cm}^{-1}$ )



## 5.TARTIŞMA

Bu çalışma, ortodontik ark telleri ve braket slotu arasında meydana gelen, dış hareketini engelleyen ya da azaltan sürtünme kuvvetlerinin en aza indirilmesi, böylece ortodontik tedavi sırasında oluşabilecek problemlerin önlenip, tedavi süresinin kısaltılması amacıyla yapılmıştır. Literatür incelendiğinde yapılan çalışmalarda, sürtünme kuvvetlerinin DLC ile kaplı ortodontik braket ya da ark teli kullanıldığında önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir(Akaike ve ark., 2015; Bentahar ve ark., 2008; S. Huang ve ark., 2013; T.-H. Huang ve ark., 2010; T. Kang ve ark., 2015; Katz ve ark., 2006; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; M Redlich ve ark., 2008). Bununla beraber literatürde hem tel hem braketin kaplandığı çok az çalışmaya rastlanılmıştır(T. Kang ve ark., 2015). Temasta olan cisimlerden sadece birine kaplama yapıldığında dahi alınan sonuçlar tatmin edici olmuştur. Bizim çalışmamız planlanırken her iki yüzeyin elmas benzeri karbon ile kaplandığı durumlarda atomların birbirlerine karşı manyetik itiş güçlerinden de faydalanılarak sürtünme kuvvetinin çok daha fazla miktarda azaltılabileceği düşüncesinden yola çıkılmıştır (Sinerjik etki).

Çalışmamızda farklı boyutlardaki kaplanmış ve kaplanmamış ark telleri, kaplanmış ve kaplanmamış braketlerle çeşitli kombinasyonlarda kullanılarak DLC kaplamanın etkisi araştırılmış, sonuç olarak kaplanmış ark tellerinin kaplanmamış ark tellerine göre, kaplanmış braketlerin kaplanmamış braketlere göre oluşturdukları sürtünme kuvveti değerlerinde önemli düşüşler elde edilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan bu kombinasyonlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısını veren ark teli-braket çiftleri tespit edilerek, kaplamanın braket ve ark teli kombinasyonu üzerindeki etkisinin araştırılması, böylece en uygun ark teli-braket çiftinin ortodontik tedavide uygulanabilirliğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, ortodontik tedavi sırasında kullanılan ark tellerinin ve braketlerin, PVD-magnetron sıçratma metodu ile üretilmiş DLC ile kaplanması sonucu, sürtünme kuvvetlerindeki azalma hakkında fikir edinilmesi sağlanmış ve gözlenen bu düşüşle tedavi kalitesinin artışı konusunda yeni yaklaşımların getirilebilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmamızda 100 adet sağ üst kanin braket (Forestadent, MBT Prescription), ve 40 adet 0.018 inç yuvarlak paslanmaz çelik tel, 40 adet 0,019x0,025 inç köşeli çelik tel ve 20 adet 0.018 inç yuvarlak nikel titanyum tel kullanılmıştır. Braketlerin tamamı .022x .028 inç slot genişliğinde olup, 0° tork ve 8° angulasyon değerine sahiptir. Braketler elmas benzeri karbon (DLC) ile kaplanacak ve kaplanmayacak braketler olmak üzere 2 gruba ayrılmıştır. Teller ise kaplanmış (n=20) , kaplanmamış (n=20) yuvarlak ve köşeli paslanmaz çelik teller ile kaplanmamış niti tel olmak üzere 5 gruba ayrılmıştır. Kaplama sisteminin sıcaklığı çok yüksek olduğu için nikel titanyum tellerin elastikiyet ve şekil hafıza özelliklerini kaybetmelerine neden olduğu için niti teller kaplanmamıştır.

Çalışmamızda kanin braketinin tercih edilmesinin sebebi çekim yapılan dişlerin genellikle premolar dişler olması ve çekim boşluklarının kanin distalizasyonu ile kapatılıyor olmasıdır. Literatürde de pek çok çalışmada kanin braketini kullanımı tercih edilmiştir(Cacciafesta, Sfondrini, Scribante, ve ark., 2003; Doshi ve Bhad-Patil, 2011; Kapila ve ark., 1990; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; Omana, 1992). Literatürde santral ve premolar braketini kullanılan çalışmalar da mevcuttur(T. Kang ve ark., 2015; M Redlich ve ark., 2008; Zhang ve ark., 2016).

Kullanılan braketler, kayma mekanikleri sırasında ark boyunca dişlerin kaydırılmasında ideal olan daha büyük boyut ve sertlikte tellerin kullanılmasına imkan veren 0.022 inç slot genişliğinde tercih edilmiştir(Akaike ve ark., 2015; Andreasen ve Quevedo, 1970; R. Kusy ve Whitley, 1989; R. P. Kusy ve Whitley, 2000; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011). 0.022 x 0.028 inç slot genişliğine sahip braketlerin, daha kalın paslanmaz çelik tellerin kullanımına olanak sağladığı için kayma mekaniği açısından avantajları olduğu belirtilmiştir(Proffit ve ark., 2007; Kapila ve ark., 1990). Slot genişliğinin sürtünme üzerinde anlamlı etkisi olmadığını savunan çalışmalar da mevcuttur(R. Kusy ve J. Whitley, Q, 1990; Tidy ve Orth, 1989). Braket materyali olarak, yapılan çalışmalarda braket materyalleri içerisinde en düşük sürtünme değerlerine sahip olan, aynı zamanda elmas benzeri karbon ile adezyonu oldukça iyi olan paslanmaz çelik tercih edilmiştir(R. Kusy ve Whitley, 1989; R. Kusy ve J. Whitley, Q, 1990; R. P. Kusy ve J. Q. Whitley, 1990; Singh, 2015). Mbt braketlerin

seçilmesindeki amaç kayma mekaniklerinde bu braketlerin çok tercih edilen braketler olmasıdır(Monteiro ve ark., 2014).

Çalışmamızda kullanılan ark telleri, sertliğinin ve yüzey özelliklerinin kayma mekanikleri için daha uygun olması ve buna bağlı olarak kanin distalizasyonu ve ve mbt sistemlerinde keser konsolidasyonu gibi işlemlerde daha sık tercih edilmesinden dolayı 0.018 ve 0.019x0.025 paslanmaz çelik olarak seçilmiştir(Frank ve Nikolai, 1980; T. Kang ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Meir Redlich ve ark., 2003; Thorstenson ve Kusy, 2001; Zhang ve ark., 2016). Nikel titanyum ark tellerinde ise başlangıç seviyeleme hizalama aşamalarında ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerinin azaltılması istenen bir durumdur. Bunun için 0,022 inç slot braketlerde sık tercih edilen 0.018 nikel titanyum ark teli tercih edilmiştir(Bazakidou ve ark., 1997; Drescher ve ark., 1989)

Çalışmamızda kaplama tekniği olarak PVD yöntemi uygulanmıştır. Literatürde pek çok farklı yöntemle kaplamaların uygulanabileceği görülmektedir(T. Kang ve ark., 2015; Kobayashi ve ark., 2005; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011).

Kaplama metodunun başarılı bir şekilde uygulanmasındaki en önemli faktörlerden biri kaplanacak yüzeyin son halidir. Hazırlanan filmlerin kalitesi ve yapışması doğrudan numune temizliği ile ilgili olduğundan, vakum ortamına girmeden önce literatüre uygun olacak şekilde bir dizi kimyasal temizlik prosedüründen geçirilmiştir. Kaplama işleminde kullanılan tüm numuneler taşıyıcıya yerleşmiş şekilde, ultrasonik temizleme cihazında aseton içerisinde 15 dakika boyunca temizlenerek yüzeyde bulunabilecek yağlardan ve kirlere arındırılmıştır. Ardından 15 dk alkol ile temizlenmiş, yüzeyde herhangi bir partikül kalmadığından emin olunmuştur. Tüm numuneler hava kurutması ile kaplamaya hazır hale gelmiştir(Kusy ve Whitley, 2000; Huang ve ark., 2013).

Çalışmamızda sürtünme testleri kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Literatüre baktığımızda hem kuru hem ıslak ortamda sürtünme deneylerinin gerçekleştirildiği çalışmalar da mevcuttur(Akaike ve ark., 2015; T. Kang ve ark., 2015; R. P. Kusy ve Whitley, 2000; Stannard ve ark., 1986). Islak ortamda yapılan çalışmalarda, insan tükürüğü ya da yapay tükürük kullanılmaktadır. İnsan



ve Kusy, 1999; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Meir Redlich ve ark., 2003; Zhang ve ark., 2016). Çalışmamızda sürtünme deneylerini yaptığımız cihaz birçok araştırmacının da kullandığı İnstron universal test cihazıdır(Akaike ve ark., 2015; Angolkar ve ark., 1990; Bednar ve ark., 1991; David James Michelberger, 1999; Thorstenson ve Kusy, 2001; Zhang ve ark., 2016). Cihaz farklı araştırmacılar tarafından diğer çalışmalarda kullanılmış olan Autograph Shimadzu AGS-J universal test cihazı (Shimadzu Corp, Kyoto, Japan) (Ho ve West, 1991), Lloyd 30K (Lloyd Instruments, Ltd, Segensworth, Fareham, England) (Ghafari, 1992; Tecco ve ark., 2005), Emic DL10000 (Sao Jose do Rio Preto, PR, Brazil) (Ogata ve ark., 1996), Tensometer 10 (Monsanto plc, Swindon, UK) (Pizzoni ve ark., 1998), Nene M3000 (Wellingborough, Northamptonshire, UK) (Khambay ve ark., 2004; Kojima ve Fukui, 2005) ve Zwick-Roell Z250 (Bayri ve ark., 2013) gibi diğer universal test cihazlarına benzer özelliklere sahip olup, çekme-sıyırma-koparma deneyleri için kullanılmaktadır.

Çalışmada kullandığımız braketler, test düzeneğine monte edilecek olan eşit boyutlara sahip dikdörtgen kesitli paslanmaz çelik plakalara yapıştırılmıştır(Bayri ve ark., 2013; Muguruma ve ark., 2013). Literatürde bu amaçla ahşap plakaların(Sugisawa ve ark., 2018) veya alüminyum plakaların kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur(Meir Redlich ve ark., 2003). Braketlerin metal plakalara yapıştırılması için bazı çalışmalarda siyanoakrilat kullanılmış olmakla birlikte, (Kojima ve Fukui, 2005; Nishio ve ark., 2004; Sugisawa ve ark., 2018) bizim çalışmamızda, çalışma süresinin uzunluğu nedeniyle hassasiyetin temini ve kullanım kolaylığı açısından ışıkla sertleşen kompozit rezin tercih edilmiştir(Bednar ve ark., 1991; Berger ve ark., 1990; Kapur ve ark., 2004; Bayri ve ark., 2013; Fidalgo ve ark., 2011; Muguruma ve ark., 2013).

Çalışmamızda ligatür materyali olarak elastomerik ligatür tercih edilmiştir. Literatürde ligatür materyali olarak elastomerik ligatürün yanı sıra paslanmaz çelik ligatürler de kullanılmıştır. Elastomerik ligatürler kolay uygulanmalarına karşın gevşek bağlanmış bir paslanmaz çelik ligatürden çok daha fazla sürtünme kuvveti oluşturmaktadır, fakat sürtünme kuvveti sıkıca bağlanmış bir tel ligatürü geçememektedir(Hain ve ark., 2003; Lima ve ark., 2010). Bağlama metodu ile ilgili yapılan çalışmalarda oluşturdukları sürtünme değerleri ile ilgili olarak farklı görüşler

savunulmaktadır. Bazı araştırmacılar tel ligatürlerin kuvvet kontrolü sağladığını dolayısıyla daha avantajlı olduğunu savunurken, bazı araştırmacılar tel ligatürlerin bağlama kuvvetinin ligatürün tur sayısına bağlı olarak değişeceğinden farklı sonuçlara sebep olabileceğini savunurlar(Omana, 1992). Genellikle paslanmaz çelik ligatürlerin elastomerik ligatürlere göre daha düşük sürtünme değerlerine sahip olduğu vurgulansa da; paslanmaz çelik ligatürler kullanıldığında bağlama sıklılığının kontrol edilememesinin, durumu elastomerik ligatürlerin lehine de çevirebildiği gözlemlenmiştir(Andreasen ve Quevedo, 1970; Chimenti ve ark., 2005; Leite ve ark., 2014; Omana, 1992; Riley, 1979). Bununla beraber bağlama yöntemleri arasında istatistiksel fark olmadığını savunan çalışmalar da vardır(Chimenti ve ark., 2005; Frank ve Nikolai, 1980). Bayri ve ark. yaptıkları tez çalışmasında tel ligatürü 7 tur olarak sınırlayarak kullanmışlardır(Bayri ve ark., 2013; Bazakidou ve ark., 1997). Bunun yanında tel ligatür ile standart bir bağlama kuvveti yakalanması çok zordur(Omana ve ark., 1992). Tüm bu literatür bilgisine dayanarak çalışmamızda kullanım kolaylığı ve bağlama kuvveti standardizasyonunun sağlanması açısından elastomerik ligatür kullanımı tercih edilmiştir(Akaike ve ark., 2015; T.-H. Huang ve ark., 2010; Katz ve ark., 2006; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; M Redlich ve ark., 2008; Meir Redlich ve ark., 2003; Sugisawa ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2016).

Sürtünme deneyi için kullanılacak test düzeneğinde aranan en önemli özellik braket ve ark teli örneklerinin, düzenek üzerine her defasında aynı şekilde yerleştirilebilmesini sağlamasıdır. Bu gereksinimleri en iyi şekilde sağlayabilmesi nedeniyle sürtünme deneyleri için, dişin ark teli boyunca kaydırılmasının simülasyonu amaçlı Redlich ve arkadaşlarının tanımlamış olduğu sistemden yararlanılmıştır. Redlich ve arkadaşları sürtünmenin standart bir şekilde test edilebilmesi için Instron cihazına yerleştirilebilecek bir parça tasarlamışlardır. Bu tasarımda parça cihazın alt bölümüne bağlanmaktadır. Ark tellerinin üst kısmı cihazın üst parçasına sıkıştırılarak sabitlenmiş alt uçlarına ise 150 gramlık bir ağırlık asılmıştır(Redlich ve ark., 2003; Muguruma ve ark., 2013). Literatürde universal test cihazı ile ölçüm yapılan çalışmaların çoğunda ağırlık kullanılmıştır(Akaike ve ark., 2015; Bazakidou ve ark., 1997; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; M Redlich ve ark., 2008; Meir Redlich ve ark., 2003; Usui ve ark., 2018). Ark tellerinin

ucuna bu ağırlığın asılmasının sebebi sürtünmeye tabi tutulacak her ark teli için standart bir gerginliğin sağlanması ve çekme deneyi sırasında ark telinde oluşacak boşalmaların engellenmesidir(Redlich ve ark., 2003; Bazakidou ve ark., 1997; Berger ve ark., 1990; Pratten ve ark., 1990).

Testin yöntemi için Kusy ve arkadaşlarının tanımlamış olduğu sistemden yararlanılmıştır. Kusy ve Whitley, 5 mm'lik mesafede 10mm/dk hızla çekme deneyi yapmışlar ve bundan daha hızlı yapılacak testlerin klinik ortamı yansıtmayacağını, bunun yanında çok yavaş yapılan sürtünme testlerinin koroziv abrazyona sebep olabileceğini savunmuşlardır(Kusy ve Whitley, 1989). Çalışmamızdaki düzenekte literatürdeki diğer çalışmalara benzer şekilde her ark teli braket boyunca 5 mm'lik mesafede 10mm/dk hızda kaydırılmıştır(T.-H. Huang ve ark., 2010; R. Kusy ve Whitley, 1989; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; Usui ve ark., 2018). Bazı araştırmacılar ise 0.5mm/dk, 1mm/dk, 6 mm/dk gibi daha düşük değerlerde ya da 20mm/dk gibi yüksek hız değerlerinde testlerini yapmışlardır(Akaike ve ark., 2015; Monteiro ve ark., 2014; Sugisawa ve ark., 2018; Tselepis ve ark., 1994). Ireland ve arkadaşları ise 1991'de test hızının etkisini araştırmak için sürtünme testlerini 0.5, 1, 5, 10, 20 ve 50 mm/dk hızda uygulamış ve değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulamamışlardır(Ireland ve ark., 1991). Bu bilgilere dayanarak, klinik ortamı yansıtmayacak kadar hızlı ya da koroziv abrazyona sebep olacak kadar yavaş olmadığı sürece, çekme hızının test verilerinde belirgin bir değişikliğe sebep olmadığı düşünülmektedir(Kusy ve Whitley, 1989; Ireland ve ark., 1991).

Güvenilirlik ve testlerin istatistiksel açıdan değerlendirilebilmesi için her bir test, 10 kez tekrarlanmıştır(Bayri ve ark., 2013; Bazakidou ve ark., 1997; Doshi ve Bhad-Patil, 2011; Loftus ve ark., 1999; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011). Her deney öncesinde tel ve braket sistemden çıkarılmış, cihaz yeniden kalibre edilerek yeni test için yeni tel ve braket yerleştirilmiştir. Sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında farklı sayılarda(3, 5, 6 gibi) deney tekrarları yapıldığı görülmektedir(Bednar ve ark., 1991; Fidalgo ve ark., 2011; R. P. Kusy ve Whitley, 2000). Bayri ve arkadaşları ise, yaptıkları

çalışmada ortodontik tedavi sırasında braketin değiştirilmediği fikrinden yola çıkarak braketleri aynı bırakmış, her test için yeni tel kullanmışlardır(Bayri ve ark., 2013). Çalışmamızda kullanılan deney sayısı, yukarıda bahsettiğimiz güvenilirlik ve istatistiksel açıdan değerlendirme göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

Sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan braketlerin slot tabanlarının yüzey morfolojisini incelemek amacı ile genellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmaktadır. Kusy ve arkadaşlarının, 1998 yılında yayınlanan çalışmalarında paslanmaz çelik ve titanyum braketin paslanmaz çelik, nikel titanyum ve beta titanyum ark telleri ile oluşturdukları sürtünme direncini incelemişler ve çalışmalarında braketlerin genel ve slot morfolojilerini incelemek amacı ile SEM kullanmışlardır(R. Kusy ve ark., 1998). Thorstenson ve Kusy, 2001 yılında yaptıkları çalışmalarında braket dizaynını ve slotunu görüntülemek amacı ile SEM kullandıklarını bildirmişlerdir(Thorstenson ve Kusy, 2001). Nishio ve arkadaşları, 2004 yılında yayınlanan çalışmalarında kullandıkları konvansiyonel paslanmaz çelik, konvansiyonel seramik ve metal slotlu seramik braketlerin yüzey morfolojilerini incelemek amacı ile SEM ile 27 büyütme altında braketlerin genel görünümünü, 200 büyütme altında slotlarını görüntülemişlerdir(Nishio ve ark., 2004). Çalışmamızda yüzey morfolojilerini incelemek için SEM analizinin yanı sıra kaplamanın karakterizasyonu ve elementel bileşimini tespit etmek için EDX analizi de yapılmıştır. EDX sonuçlarına göre kaplamanın içeriği ve numuneler üzerine başarılı şekilde tutunduğu gösterilmiştir.

Ark teli ve braketlere kaplama yapılan çalışmalarda kaplama tabakasındaki karbon filmin karakterizasyonu için Raman analizi kullanılmaktadır(S. Huang ve ark., 2013; T. Kang ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; Muguruma ve ark., 2018). Bizim çalışmamızda da literatürle aynı şekilde Raman spektroskopisinden faydalanılmıştır. Raman spektroskopisi karbon materyalleri olan elmas, grafit, karbon nanotüpler, elmas benzeri karbon gibi yapıların karakterizasyonunda kullanılan hızlı ve örneklere zarar vermeyen bir yöntemdir. Özellikle elmas benzeri karbon yapıların bağ yapısını karakterize etmek için en iyi yöntemdir(Andrea Carlo Ferrari ve Robertson, 2004). Çalışmamızda elde ettiğimiz Raman sonuçlarına göre, DLC film başarılı bir şekilde



paslanmaz çelik tel ve braket numunelerimize biriktirilebilmiştir. DLC kaplamadaki  $sp^3/sp^2$  bağ oranı ne kadar fazla olursa kaplama elmas benzeri özellikler göstermeye başlamaktadır. Çalışmamızda bu oran braketler için ortalama 0,886, ark telleri için ortalama 0,868 bulunmuştur. Literatürde bununla ilgili yapılmış çalışmalarda elde edilen oranlara yakındır ve kaplama karakterinin elmas benzeri özellikte olduğunu göstermektedir(Akaike ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011; Muguruma ve ark., 2018). Bu durum sürtünme kuvvetlerinde düşüş olmasını sağlayan faktörlerden biridir.

Yapmış olduğumuz kaplamanın kalınlığının değerlendirilmesi için silisyum altlıkların kırık kesitleri üzerinde SEM analizi yapılmıştır. Buna göre kaplama kalınlığı 0,832  $\mu m$  olarak tespit edilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinde homojen kaplama tabakaları elde edildiği tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında farklı kaplama kalınlıkları elde edildiği gözlenmiştir. Muguruma ve arkadaşları 2011'de yayınlamış oldukları çalışmada braketler üzerindeki DLC kaplama kalınlığının yaklaşık olarak 5-7  $\mu m$  olduğunu bildirmiş, gelecek çalışmalar için daha ince DLC kaplamaların geliştirilmesi gerektiğinden söz etmişlerdir(Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011). Yine Muguruma ve arkadaşlarının nikel titanyum ve paslanmaz çelik tellere DLC kaplama yaptıkları çalışmalarında kaplama kalınlığının yaklaşık 0.5  $\mu m$  olduğunu tespit etmişlerdir(Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011). Kobayashi ve arkadaşlarının 2005'te yayınladıkları çalışmada nikel titanyum teller üzerindeki kaplama kalınlığı 1  $\mu m$  olarak bildirilmiştir. Akaike ve arkadaşları paslanmaz çelik braketlere DLC kaplama uygulamışlar ve kaplama kalınlığını 1  $\mu m$  olarak ölçmüşlerdir(Akaike ve ark., 2015). Kaplama kalınlıklarının 1  $\mu m$  olduğu başka pek çok çalışma mevcuttur(Frois ve ark., 2019; Ma ve ark., 2011; Zhang ve ark., 2016). Huang ve arkadaşları ise PECVD ile DLC ve TiN ince filmleri biriktirilmiş braketleri karşılaştırdıkları çalışmada, kaplama kalınlığının kontrol altında tutulduğunu vurgulamış, ancak kalınlık değeri bildirmemişlerdir(T.-H. Huang ve ark., 2010). Literatürde bu değerlerden çok daha ince kaplama tabakalarının elde edildiği çalışmalar da mevcuttur. Huang ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada nikel titanyum teller üzerindeki DLC kalınlığını 0.1  $\mu m$  olarak bildirmişlerdir. Çalışmada MCECR (mirror confinement-type electron cyclotron resonance) kullanıldığı ve kaplama süresinin 25 dakika olduğu da vurgulanmıştır(S. Huang ve ark., 2013). Yine ince DLC

kaplama tabakalarının elde edildiği çalışmalara örnek olarak MCECR kaplama yöntemi kullanılarak 0,2 µm kalınlığın elde edildiği Kang ve arkadaşlarının çalışması ve PBIID kaplama yöntemi kullanılarak 0,3 µm kalınlığın elde edildiği Muguruma ve arkadaşlarının çalışması gösterilebilir(T. Kang ve ark., 2015; Muguruma ve ark., 2018).

AFM analizleri sonucu ark tellerinin yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde, kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinde çok fazla bir değişim meydana gelmemiştir. SEM ve AFM analizlerinin de gösterdiği gibi paslanmaz çelik ark telleri zaten oldukça pürüzsüz yüzeylere sahiptirler. Bunun yanı sıra kaplama tabakası ince olduğu için yüzey pürüzlülüğünü azaltmada çok etkili olmamıştır. Ark tellerinin yüzey pürüzlülüğünde azalma olmamasına rağmen braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvveti değerlerinde azalma olmuştur. Braketlerin üretim tekniğine bağlı olarak slot yüzeyleri pürüzlü olabilmekte ve slot köşelerinde slot çapaklarına ve pörözitelere rastlanılabilmektedir. Çalışmamızda kullandığımız braketlerin slot yüzeylerinin pürüzlü olduğu, slot ortasındaki yiv etrafında slot çapaklarının ve pörözitelerin mevcut olduğu gösterilmiştir. Braketin yüzeyinde üretim esnasında oluşan bu pürüzler sürtünmeyi artırarak aşınma dayanımını da azaltmaktadır. Çalışmamızda da kaplama sonrası braket yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı gösterilmiştir. Braket kaplaması yüzey pürüzlülüğünü azaltmada etkili olurken tel kaplaması çok etkili olamamıştır. Literatür incelendiğinde, kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinde anlamlı fark bulunamayan çalışmalar olduğu gibi pürüzlülükte azalma bulunan çalışmalar da mevcuttur(Akaike ve ark., 2015; S. Huang ve ark., 2013; T. Kang ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma ve ark., 2018). Yüzey pürüzlülüğü dışında sürtünmeyi etkileyen pek çok faktör mevcuttur. Bunlardan biri olan malzemelerin yüzey sertliği değerlerine baktığımız zaman çalışmamızda kaplama sonrası ark tellerinin sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu faktör de sürtünme değerlerini azaltmada önemli bir etkidir. Literatür incelendiğinde bizim çalışmamızla benzer şekilde kaplanmış materyallerin sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir(Akaike ve ark., 2015; S. Huang ve ark., 2013; T.-H. Huang ve ark., 2010; T. Kang ve ark., 2015; Kao ve ark., 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011).

Çalışmamızda her bir braket-ark teli kombinasyonu için statik sürtünme kuvveti değerleri ölçülmüştür. Bunun sebebi dişlerin ark teli üzerindeki hareketinin sürekli tipte bir hareketten ziyade, devrilme ve dikleşme hareketlerinden oluşan hareket dizisi şeklinde olmasıdır. Bu davranış göz önüne alındığında, ortodontik diş hareketi sırasında statik sürtünme kuvveti, kinetik sürtünme kuvvetinden daha fazla önem kazanmaktadır (Chimenti ve ark., 2005; Jones ve ark., 2002; Omana, 1992; Meir Redlich ve ark., 2003). Literatürde de sürtünme kuvveti olarak daha çok statik sürtünme kuvveti ölçülmüş ve dikkate alınmıştır (Akaike ve ark., 2015; Doshi ve Bhad-Patil, 2011; Frank ve Nikolai, 1980; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Muguruma ve ark., 2017; Meir Redlich ve ark., 2003; Tantiwinyupong ve ark., 2019).

Yapılan deney sonuçları Instron universal test cihazına bağlı bilgisayara yüklenmiş olan Bluehill2 yazılımıyla alınmış olup, her deney sırasında oluşan sürtünme kuvvetleri X-Y koordinat sistemi üzerinde bir grafik olarak gösterilmiştir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda olduğu gibi hareket başladıktan sonra ölçülen maksimum kuvvet değeri statik sürtünme kuvveti olarak alınmıştır (Baccetti ve Franchi, 2006; Chimenti ve ark., 2005; Hain ve ark., 2003; T.-H. Huang ve ark., 2010; Read-Ward ve ark., 1997).

Çalışmamızda elde ettiğimiz numuneler 10 gruba ayrılmıştır ve sürtünme testlerine tabi tutulmuştur. Bu numune grupları aşağıdaki gibidir. (Tablo 5.1., Tablo 5.2., Tablo 5.3.)

**Tablo 5.1.** 0.018 çelik tel ve braket grupları. SS ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>1.grup</b>	0,018 SS	SS
<b>2.grup</b>	0,018 SS	DLC
<b>3.grup</b>	0,018 DLC	SS
<b>4.grup</b>	0,018 DLC	DLC

**Tablo 5.2.** 0.019x0.025 çelik tel ve braket grupları. SS ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>5.grup</b>	0,019x0,025 SS	SS
<b>6.grup</b>	0,019x0,025 SS	DLC
<b>7.grup</b>	0,019x0,025 DLC	SS
<b>8.grup</b>	0,019x0,025 DLC	DLC

**Tablo 5.3.** 0.018 ni-ti tel ve braket grupları. SS ifadesi telin veya braketin kaplamasız olduğunu, DLC ifadesi telin veya braketin kaplamalı olduğunu ifade etmektedir.

	<b>TEL</b>	<b>BRAKET</b>
<b>9.grup</b>	0,018 ni-ti	SS
<b>10.grup</b>	0,018 ni-ti	DLC

Çalışmamızda her gruptaki tel ve braket çiftleri için sürtünme deneyleri 10'ar kez tekrarlanmıştır. Toplam 100 deney yapılmıştır. Çalışmamız karşılaştırmalı bir analiz içerdiğinden gruplar kendi içlerinde eşleştirilerek tartışılacaktır.

0,018 inç paslanmaz çelik teller ve braketlerin oluşturduğu ilk 4 grubun değerleri bulgularımızın ilk kısmını oluşturmaktadır. Yapılan deneylerde kaplamasız tel ve kaplamasız braketlerin (1.grup) sürtünme kuvveti değerleri diğer üç grubun (2., 3., 4. grup) sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. Bu durum DLC kaplamanın varlığının sürtünme kuvvetini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir.

Kaplanmış braket ve kaplanmamış tel grubunun (2.grup) sürtünme kuvveti değerleri her ikisinde kaplamasız (1.grup) gruptan anlamlı ölçüde düşük bulunmuştur. DLC ile braketin kaplandığı çalışmalardan Muguruma ve arkadaşlarının yapmış olduğu

çalışmada, 0.018 ve 0.017x 0.025 inç paslanmaz çelik teller, iki farklı atmosferik ortamda DLC ile kaplanmış olan üst kanin braketleri (3M, mini-unitwin) ile test edilmiştir. Buna göre DLC kaplanmış braketler ile 0.017x 0.025 ss tellerden elde edilen statik sürtünme kuvveti değerleri, kontrol grubuna ait değerlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede düşük bulunmuştur. Birinci ortamda 0.018 ss tellerde ise statik sürtünme kuvvetinde düşüş olmasına rağmen istatistiksel olarak anlamlı fark bulunamamıştır. Kinetik sürtünme kuvveti ise her iki tel için de kaplamalı braketlerde anlamlı ölçüde azalmıştır(Muguruma, Iijima, Brantley, Nakagaki, ve ark., 2011). Bu çalışma her ne kadar bizim çalışmamızla benzer olsada kullanılan materyal ve metod yönünden bizim çalışmamızla bir takım farklılıklara sahiptir. Kullanılan braket ve ark teli markası (3M) çalışmamızda kullanılan braket ve tel markasından (Forestadent) farklıdır. Dolayısıyla üretim tekniği ve yüzey özellikleri açısından bizim materyallerimizden farklı özelliklere sahiptir. Çalışmamızda daha öncede bahsedildiği gibi malzemelerin yüzey özellikleri o malzemelerin diğer yüzeylerle oluşturdukları sürtünme davranışlarını etkilemektedir. Kaplama yöntemi olarak PBIID (plasma based ion implantation) yöntemiyle kaplama yapılmıştır. Bizim çalışmamızda kullanılan kaplama metodu PVD'dir dolayısıyla elde edilen kaplama kalınlığı ve karakterizasyonu farklıdır. Bu çalışmada sürtünme deneyleri 10°'lik angulasyonda gerçekleştirilirken bizim çalışmamızda ise braket tel açılanması 0°'dir. Angulasyon arttıkça kilitleme ve çentiklenme faktörleride devreye girip sürtünme kuvveti üzerinde etkili olmaktadır. Bu faktörler kaplamanın aşınma direncini düşürmüştü ve dolayısıyla sürtünme kuvvetlerini etkilemiş olabilir. Bizim çalışmamızla farklı sonuçlar elde edilmesinin sebeplerinin bu faktörler olabileceği düşünülmüştür.

Kaplanmış tel ve kaplanmamış braket grubunun (3.grup) sürtünme kuvveti her ikiside kaplanmamış gruptan (1.grup) anlamlı ölçüde düşük bulunmuştur. Bizim çalışmamızla benzer bir çalışma olan Mugurama ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 0,018 ss tellere DLC kaplama uygulanmış ve kanin braketleriyle test edilmiştir. Kaplamalı tellerin braketlerle oluşturduğu sürtünme kuvvetleri kaplamasız gruptan anlamlı derecede düşük bulunmuştur(Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011). Sonuçlar bizim çalışmamızla tutarlıdır.

Kaplanmış braket kaplanmamış tel grubunun (2.grup) sürtünme kuvveti kaplanmış tel kaplanmamış braket grubunun (3.grup) sürtünme kuvvetinden anlamlı ölçüde düşük bulunmuştur. Bu bulgu, sürtünme kuvvetini azaltmada sadece braket kaplama yapılmasının sadece tele kaplama yapılmasından daha etkili olduğunu göstermiştir. Braketlerin üretim tekniğine bağlı olarak slot yüzeylerinin pürüzlü olduğu, slot ortasındaki yiv etrafında slot çapaklarının ve pörözitelerin mevcut olduğu gösterilmiştir. Braketin yüzeyinde üretim esnasında oluşan bu pürüzlerin parlatma ve polisaj işlemleri iyi yapılamamış ve bu durum sürtünmeyi artırmıştır. Çalışmamızda da kaplama sonrası braket yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı gösterilmiştir. Daha önce bulgularımızda bahsettiğimiz gibi paslanmaz çelik ark telleri neredeyse pürüzsüz yüzeylere sahiptir ve kaplama sonrası da yüzey pürüzlülüklerinde çok değişiklik olmamıştır. Ark teline kaplama yapılan çalışmalarda da bizim çalışmamızla benzer şekilde kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinde çok değişikliğe rastlanılmamıştır(Akaike ve ark., 2015; T. Kang ve ark., 2015). Bu faktörler göz önüne alındığında, braketeye uygulanan kaplamanın bu pürüzleri gidermede oldukça etkili olduğu ve braket kaplamasının sürtünmeyi azaltmada tel kaplamasından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Literatürde bununla ilgili 0,018 ss telin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bizim çalışmamıza benzer olarak 2015 yılında Marmara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Ortodonti Anabilim Dalında yapılmış doktora tez çalışmasında 0,018 inç paslanmaz çelik tellere ve 0,022 inç slot braketlere PECVD metoduyla DLC kaplama uygulanmış ve sürtünme değerleri karşılaştırılmıştır(Karabağlar, 2015). Bu çalışmada da bizim çalışmamızla benzer şekilde sadece braketin kaplandığı grubun sürtünme kuvveti değerleri sadece telin kaplandığı grubun sürtünme kuvveti değerlerinden düşük bulunmuştur.

Dört grup içinde en düşük sürtünme kuvveti hem telin hem braketin kaplamalı olduğu 4.grupta elde edilmiştir. Bu durum her iki yüzeyin de kaplamalı olmasının sürtünme üzerinde çok daha büyük etkisi olduğunu göstermektedir. Literatürde hem telin hem braketin kaplandığı çok az çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmalardan biri olan Kang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 0,019x0,025 ss teller ve braketlere DLC kaplama uygulanmış ve sürtünme kuvvetleri incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan tel boyutu farklı olsada hem telin hem braketin kaplamalı olduğu grubun en düşük sürtünme kuvveti oluşturması bizim çalışmamızla tutarlıdır. Karabağlar'ın yapmış

olduđu doktora tez çalıřmasında da bizim çalıřmamızla benzer řekilde her ikisinin de kaplamalı olduđu grup en dūřuk sūrtünme kuvveti deđerlerini vermiřtir(Karabađlar, 2015). Sadece braket kaplaması veya sadece tel kaplamasının sūrtünme kuvvetinde sađladıđı azalmanın toplamı hem tel hem braket kaplamasının sađladıđı toplam azalmadan dūřuktur. Bu durum çalıřmamızın bařında belirttiđimiz gibi her iki yūzeyinde kaplamalı olması durumunda ortaya çıkan sinerjik etkiyi gōstermektedir.

0,019x0,025 inç paslanmaz elik teller ve braketlerin oluřturduđu grupların deđerleri (5., 6., 7., 8. grup) bulgularımızın ikinci kısmını oluřurmaktadır. Yapılan deneylerde kaplamasız tel ve kaplamasız braketlerin (5.grup) sūrtünme kuvveti deđerleri 0,018 in ss gruplarıyla benzer řekilde diđer ũ grubun (6., 7., 8. grup) sūrtünme kuvveti deđerlerinden anlamlı derecede yūksek bulunmuřtur.

Kaplanmış braket kaplanmamıř tel grubunun (6.grup) sūrtünme kuvveti deđerleri her ikisinde kaplamasız (5.grup) gruptan anlamlı ōlde dūřuk bulunmuřtur. Literatūr incelendiđinde 0,022 in slot braketlere DLC kaplama yapılan ve 0,019x0,025 ss tellerle oluřturdukları sūrtünme kuvvetleri incelen çalıřmalarda kaplamalı braketlerin sūrtünme kuvvetlerinde bizim çalıřmamızla benzer řekilde anlamlı derecede dūřuř bulunmuřtur(Akaike ve ark., 2015; Akaike ve ark., 2016). Kalın tellerde, kaplanmış braketler sūrtünmeyi azalttıđı için kayma mekaniklerinde etkin diř hareketi için būyūk bir avantaj sađladıđı belirtilmiřtir(Akaike ve ark., 2015). Bizim alıřmamızda da DLC kaplama varlıđı sūrtünmeyi azaltmada oldukça bařarılı olmuřtur.

Huang ve arkadařlarının yaptıđı çalıřmada ise 0,022 in slot paslanmaz elik braketler 3 gruba ayrılmıř ve braketlere DLC ve TiN kaplamalar yapılmıřtır. Būtūn braket grupları 0,019x0,025 ss tellerle test edilip karřılařtırılmıř olup, DLC kaplı braketlerden elde edilen statik sūrtünme kuvveti deđerlerinin, diđer tūm gruplardan daha dūřuk olduđu tespit edilmiřtir(T.-H. Huang ve ark., 2010). Sonuçlar bizim çalıřmamızla tutarlıdır.

Literatūrde bizim sonuçlarımızdan farklı sonuçların bulunduğu Kang ve arkadaşları'nın yapmış oldukları çalışmada 0,019x0,025 ss tellere ve 0,022 in slot premolar braketlere DLC kaplama uygulanmıştır. Kaplanmış braket kaplanmamış tel grubunda her ikisi de kaplamasız gruba gōre sūrtünme kuvvetinde dūřuř olmasına

rağmen anlamlı fark bulunamamıştır. Bizim çalışmamızda ise bundan farklı olarak kaplamalı braketlerde kaplamasız olanlara göre anlamlı ölçüde düşüş olmuştur. Bizim çalışmamızda sürtünme deneyleri çekme cihazıyla yapılmıştır ve SEM görüntülerinde slot kenarlarında kaplama tabakasında herhangi bir aşınma gözlenmemiştir. Kang ve arkadaşlarının çalışmasında ise sürtünme deneyleri çekme cihazı ile değil bu deney için özel olarak tasarlanmış titreşim veren iki yönlü lineer git gel hareketi yapan bir test cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca çalışmada dikkate alınan statik değil kinetik sürtünme kuvvetidir ve başlangıçta sürtünmenin düşük ölçüldüğü deneyin ilerleyen aşamalarında arttığı söylenmiştir. Yapılan SEM analizinde braket tabanıyla kenarı arasında kaplamanın kalktığı gözlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen kaplamanın çok ince olması (0,2 $\mu$ m) ve sürtünme deneyinin yapıldığı test cihazının sürekli git gel hareketleri yapması dolayısıyla bu ince kaplama tabakasının yıprandığı ve bu sebepten kaplamalı braketlerde sürtünmeyi azaltmada başarı elde edemedikleri düşünülmüştür. Kullanılan yöntemin ve dikkate alınan sürtünme kuvvetlerinin farklı olmasının farklı sonuçlara sebep olduğu düşünülmektedir.

Çalışmamızda kaplanmış tel kaplanmamış braket grubunun (7.grup) sürtünme değerleri ikiside kaplanmamış gruptan (5.grup) anlamlı derecede düşük bulunmuştur. Literatür incelendiğinde 0,019x0,025 ss tellere DLC kaplama yapılan ve 0,022 inç slot braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetleri incelen çalışmalarda kaplamalı tellerin sürtünme kuvvetlerinde bizim çalışmamızla benzer şekilde anlamlı derecede düşüş bulunmuştur(T. Kang ve ark., 2015; Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Zhang ve ark., 2016)

Çalışmamızda kaplanmış braket kaplanmamış tel grubunun (6.grup) sürtünme kuvveti değerleri kaplanmış tel-kaplanmamış braket grubunun (7.grup) sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı ölçüde düşük bulunmuştur. Bu durum bize tıpkı 0,018 ss telde olduğu gibi DLC kaplı braket kullanımının DLC kaplı tel kullanımından daha etkili olabileceğini düşündürmektedir. Daha önce de bahsedilen Kang ve arkadaşlarının çalışmasında ise sadece telin kaplamalı olduğu grup, sadece braketin kaplamalı olduğu gruptan daha düşük sürtünme değerleri vermiştir. Bu bulgu bizim bulgularımızdan farklıdır. Bunun sebebi daha önce 0,018 ss tel ve braket grupları incelenirken bahsedildiği gibi braketlerin üretim tekniğine bağlı olarak slot yüzeyleri pürüzlü



olabilmekte ve slot köşelerinde slot çapaklarına ve pörözitelere rastlanılabilmektedir. Braketin yüzeyinde üretim esnasında oluşan bu pürüzler sürtünmeyi artırarak aşınma dayanımını da azaltmaktadır. 0,018 paslanmaz çelik tel de olduğu gibi 0,019x0,025 paslanmaz çelik ark telleri de oldukça pürüzsüz yüzeylere sahiptir ve kaplama sonrası da yüzey pürüzlülüklerinde çok değişiklik olmamıştır. Dolayısıyla braket kaplaması sürtünmeyi azaltmada tel kaplamasından daha başarılı olmuştur. Bizim çalışmamızda kullanılan braket ve tel markasının, kaplama yönteminin ve sürtünme deney yönteminin farklı olmasının da olası sebepler arasında olduğu düşünülmektedir.

Hem tel hem braketin kaplamalı olduğu grubun (8.grup) sürtünme kuvveti değerleri her ikisinin de kaplamasız olduğu ve sadece birinin (tel yada braket) kaplamalı olduğu gruplardan anlamlı derecede düşük bulunmuştur. Literatürde 0,019x0,025 ss tel ve braketin aynı anda kaplandığı tek çalışmaya rastlanılmıştır(T. Kang ve ark., 2015). Kang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada hem telin hem braketin kaplamalı olduğu grup her ikiside kaplamasız olan yada tek bir materyalin kaplamalı olduğu gruplardan çok daha düşük sürtünme değerleri vermiştir. Bu sonuçlar bizim çalışmamızla tutarlıdır. Çalışmamızın başında belirttiğimiz gibi her iki yüzeye de kaplama yapılması tek yüzeye kaplama yapılmasından daha başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

0,018 nikel titanyum teller ve braketlerin sürtünme kuvvetleri çalışmamızın üçüncü kısım bulgularını oluşturmaktadır. Çalışmamızda kaplanmamış braket ve tellerin oluşturduğu sürtünme kuvveti değerleri kaplanmış braket ve tellerin oluşturduğu sürtünme kuvveti değerlerinden anlamlı ölçüde yüksek bulunmuştur. Literatürde kaplanmış braket ve ni-ti tellerin test edildiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde genellikle nikel titanyum tellere kaplama uygulanmış ve paslanmaz çelik braketlerle oluşturdukları sürtünme kuvvetleri incelenmiştir(Muguruma, Iijima, Brantley, ve Mizoguchi, 2011; Sugisawa ve ark., 2018; Tantiwinyupong ve ark., 2019). Kaplama sistemimizin sahip olduğu yüksek sıcaklıktan dolayı ni-ti tellere kaplama yapılamamıştır. Bu durum çalışmamızın eksikliği olarak değerlendirilebilir.

Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçları daha net ifade edebilmek amacıyla yüzde değerleri de hesaplanmıştır. Buna göre, sistemdeki statik sürtünme kuvveti değerlerinde 0,018 ss teller için, DLC kaplı olmayan braketler ile DLC kaplı olmayan tel kullanımı

yerine, DLC kaplı braket ve DLC kaplı tel kullanıldığında %48, sadece DLC kaplı braket kullanıldığında %28, sadece DLC kaplı tel kullanıldığında %15 oranında düşüş sağlanmıştır. 0,019x0,025 ss teller için, sistemdeki statik sürtünme kuvveti değerlerinde, DLC kaplı olmayan braket ile DLC kaplı olmayan tel kullanımı yerine, DLC kaplı braket ve DLC kaplı tel kullanıldığında %53, sadece DLC kaplı braket kullanıldığında %39, sadece DLC kaplı tel kullanıldığında %27 oranında düşüş sağlanmıştır. 0,018 ni-ti teller için sistemdeki statik sürtünme kuvveti değerlerinde DLC kaplı olmayan braketler yerine, DLC kaplı braket kullanıldığında %36 'lık düşüş sağlanmıştır.

DLC nin ortodontik malzemelerin sürtünme özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalara bakıldığında, DLC nin braket ve tele aynı anda uygulanarak test edildiği çok az çalışma mevcuttur(T. Kang ve ark., 2015; Karabaglar, 2015). Yapılan çalışmaların birçoğu sadece tel ya da sadece braket ile sınırlı kalmıştır.

## 6.SONUÇ ve ÖNERİLER

PVD metodu ile DLC kaplanmış ark telleri ve braketlerin yüzey özellikleri ve sürtünme davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ortaya çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Ortodontik uygulamalarda kullanılan materyallere uygulanan DLC kaplamalar yüzey özelliklerini geliştirmede önemli role sahiptir.
2. DLC'nin braket veya teller üzerindeki varlığı statik sürtünme kuvvetinin azaltılmasında etkilidir.
3. Sürtünme kuvvetinin azaltılmasında DLC kaplı braket kullanımı DLC kaplı tel kullanımından daha etkilidir.
4. En düşük statik sürtünme kuvveti değerleri her iki tel grubunda da DLC kaplı braket ve DLC kaplı telin birlikte kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu durum ortodontik ark tellerinin ve braketlerin her ikisine birden DLC kaplama yapılmasının sürtünme kuvveti değerlerinde çok daha belirgin bir azalma sağlayacağı düşüncemizi doğrulamaktadır.

### Öneriler

- ✓ Kaplama çeşitliliği artırılarak, farklı braket gruplarıyla çalışılabilir.
- ✓ Sürtünmeye etki eden diğer ligatür elemanlarıyla çalışma yapılabilir.
- ✓ Estetik görüntü sağlayacak kaplama renkleriyle çalışmalar yapılabilir.
- ✓ DLC kaplamanın ark teli ve braket üzerinde ki korozyon etkisi araştırılıp diğer kaplama türlerine göre kıyaslanabilir.
- ✓ Deneyler ağız içi ortamda gerçekleştirilip kaplamaların ağız içi ortama maruz kaldığı zaman gösterecekleri aşınma ve korozyon davranışları incelenebilir.

## 7.KAYNAKLAR

- Aisenberg, S., & Chabot, R. (1971). Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon. *Journal of applied physics*, 42(7), 2953-2958.
- Aisenberg, S., & Chabot, R. (1973). Physics of ion plating and ion beam deposition. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 10(1), 104-107.
- Akaïke, S., Hayakawa, T., Kobayashi, D., Aono, Y., Hirata, A., Hiratsuka, M., & Nakamura, Y. (2015). Reduction in static friction by deposition of a homogeneous diamond-like carbon (DLC) coating on orthodontic brackets. *Dental materials journal*, 34(6), 888-895.
- Akaïke, S., Kobayashi, D., Aono, Y., Hiratsuka, M., Hirata, A., Hayakawa, T., & Nakamura, Y. (2016). Relationship between static friction and surface wettability of orthodontic brackets coated with diamond-like carbon (DLC), fluorine-or silicone-doped DLC coatings. *Diamond and Related Materials*, 61, 109-114.
- Andreasen, G. F., & Morrow, R. E. (1978). Laboratory and clinical analyses of nitinol wire. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 73(2), 142-151.
- Andreasen, G. F., & Quevedo, F. R. (1970). Evaluation of friction forces in the 0·022×0·028 edgewise bracket in vitro. *Journal of Biomechanics*, 3(2), 151-160.
- Angolkar, P. V., Kapila, S., Duncanson Jr, M. G., & Nanda, R. S. (1990). Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(6), 499-506.
- Arango, S., Peláez-Vargas, A., & García, C. (2013). Coating and surface treatments on orthodontic metallic materials. *Coatings*, 3(1), 1-15.
- Arash, V., Rabiee, M., Rakhshan, V., Khorasani, S., & Sobouti, F. (2015). In vitro evaluation of frictional forces of two ceramic orthodontic brackets versus a stainless steel bracket in combination with two types of archwires. *Journal of orthodontic science*, 4(2), 42.
- Araújo, R. C., Bichara, L. M., de Araujo, A. M., & Normando, D. (2014). Debris and friction of self-ligating and conventional orthodontic brackets after clinical use. *The Angle Orthodontist*, 85(4), 673-677.
- Arenas-Lago, D., Rodríguez-Seijo, A., Couce, L. A., & Vega, F. A. (2017). A Multianalytical Approach for the Assessment of Toxic Element Distribution in Soils From Mine and Quarry Areas *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils* (pp. 33-62): Elsevier.
- Arici, N., Akdeniz, B. S., & Arici, S. (2015). Comparison of the frictional characteristics of aesthetic orthodontic brackets measured using a modified in vitro technique. *The Korean Journal of Orthodontics*, 45(1), 29-37.
- Articolo, L. C., Kusy, K., Saunders, C. R., & Kusy, R. P. (2000). Influence of ceramic and stainless steel brackets on the notching of archwires during clinical treatment. *The European Journal of Orthodontics*, 22(4), 409-425.
- Articolo, L. C., & Kusy, R. P. (1999). Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 115(1), 39-51.
- Baccetti, T., & Franchi, L. (2006). Friction produced by types of elastomeric ligatures in treatment mechanics with the preadjusted appliance. *The Angle Orthodontist*, 76(2), 211-216.

- Baker, K. L., Nieberg, L. G., Weimer, A. D., & Hanna, M. (1987). Frictional changes in force values caused by saliva substitution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 91(4), 316-320.
- Bayri, R., Yilmaz, H. N., Koc, E., & Kucukkeles, N. (2013). Evaluation of Friction of Different Ligation Methods In Accordance With and Without Bracket Types. *Turkish J Orthod Vol*, 26(2).
- Bazakidou, E., Nanda, R. S., Duncanson Jr, M. G., Sinha, P., & of Oklahoma, F. T. U. (1997). Evaluation of frictional resistance in esthetic brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 112(2), 138-144.
- Bednar, J. R., Gruendeman, G. W., & Sandrik, J. L. (1991). A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 100(6), 513-522.
- Bentahar, Z., BARQUINS, M., Martial, C., BOUHAMMAD, N., & EL BOUSSIRI, K. (2008). Tribological performance of DLC-coated stainless steel, TMA and Cu-NiTi.
- Bentahar, Z., Bellamine, M., Zertoubi, M., Irhzo, A., & El Boussiri, K. (2010). Relationship between electrochemical corrosion and the tribologic properties of orthodontic alloys. *International orthodontics*, 8(4), 360-371.
- Bergman, M., Bergman, B., & Söremark, R. (1980). Tissue accumulation of nickel released due to electrochemical corrosion of non-precious dental casting alloys. *Journal of oral rehabilitation*, 7(4), 325-330.
- Bewilogua, K., Wittorf, R., Thomsen, H., & Weber, M. (2004). DLC based coatings prepared by reactive dc magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 447, 142-147.
- Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook, two volume set*: CRC press.
- Bourauel, C., Fries, T., Drescher, D., & Plietsch, R. (1998). Surface roughness of orthodontic wires via atomic force microscope, laser specular reflectance, and profilometry. *The European Journal of Orthodontics*, 20(1), 79-92.
- Buehler, W. J., Gilfrich, J., & Wiley, R. (1963). Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Journal of applied physics*, 34(5), 1475-1477.
- Burstone, C. J., & Goldberg, A. J. (1980). Beta titanium: a new orthodontic alloy. *American journal of orthodontics*, 77(2), 121-132.
- Cacciafesta, V., Sfondrini, M. F., Ricciardi, A., Scribante, A., Klersy, C., & Auricchio, F. (2003). Evaluation of friction of stainless steel and esthetic self-ligating brackets in various bracket-archwire combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(4), 395-402.
- Cacciafesta, V., Sfondrini, M. F., Scribante, A., Klersy, C., & Auricchio, F. (2003). Evaluation of friction of conventional and metal-insert ceramic brackets in various bracket-archwire combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(4), 403-409.
- Caliskan, M. (2008). *Katodik Ark Yöntemiyle ZrN ve Zr/ZrN Kaplamaların Biriktirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Callister. (1994). *Materials science and engineering: an introduction (ed 3)*: New York: John Wiley & Sons.
- Chen, H., Han, B., & Xu, T. (2019). Effect of different combinations of bracket, archwire and ligature on resistance to sliding and axial rotational control during the first stage of orthodontic treatment: An in-vitro study. *The Korean Journal of Orthodontics*, 49(1), 21-31.
- Chimenti, C., Franchi, L., Di Giuseppe, M. G., & Lucci, M. (2005). Friction of orthodontic elastomeric ligatures with different dimensions. *The Angle Orthodontist*, 75(3), 421-425.

- Choi, S., Hwang, E. Y., Park, H. K., & Park, Y. G. (2015). Correlation between frictional force and surface roughness of orthodontic archwires. *Scanning*, 37(6), 399-405.
- Courtel R. , T. L. M. (1964). A BRIEF HISTORY OF FRICTION. *Naval Engineers*.
- Czichos, H. (2009). *Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear* (Vol. 1): Elsevier.
- de Assumpção Pereira-da-Silva, M., & Ferri, F. A. (2017). Scanning Electron Microscopy *Nanocharacterization Techniques* (pp. 1-35): Elsevier.
- De Franco, D. J., Spiller Jr, R. E., & Von Fraunhofer, J. (1995). Frictional resistances using Teflon-coated ligatures with various bracket-archwire combinations. *The Angle Orthodontist*, 65(1), 63-72.
- De Maeztu, M. A., Braceras, I., Sánchez-Garcés, M., & Gay-Escoda, C. (2007). Histomorphometric study of ion implantation and diamond-like carbon as dental implant surface treatments in beagle dogs. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 22(2).
- Dickson, J., Jones, S., & Davies, E. (1994). A comparison of the frictional characteristics of five initial alignment wires and stainless steel brackets at three bracket to wire angulations—an in vitro study. *British journal of orthodontics*, 21(1), 15-22.
- Donnet, C., & Erdemir, A. (2007). *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*: Springer Science & Business Media.
- Doshi, U. H., & Bhad-Patil, W. A. (2011). Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139(1), 74-79.
- Drescher, D., Bourauel, C., & Schumacher, H.-A. (1989). Frictional forces between bracket and arch wire. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(5), 397-404.
- Echols, P. M. (1975). Elastic ligatures: Binding forces and anchorage taxation. *American journal of orthodontics*, 67(2), 219-220.
- Enke, K., Dimigen, H., & Hübsch, H. (1980). Frictional properties of diamondlike carbon layers. *Applied Physics Letters*, 36(4), 291-292.
- Evans, A., Franks, J., & Revell, P. (1991). Diamond-like carbon applied to bioengineering materials. *Surface and Coatings Technology*, 47(1-3), 662-667.
- Farrant, S. D. (1977). An evaluation of different methods of canine retraction. *British journal of orthodontics*, 4(1), 5-15.
- Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical review B*, 61(20), 14095.
- Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2004). Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 362(1824), 2477-2512.
- Fidalgo, T. K. d. S., Pithon, M. M., Maciel, J. V. B., & Bolognese, A. M. (2011). Friction between different wire bracket combinations in artificial saliva: an in vitro evaluation. *Journal of Applied Oral Science*, 19(1), 57-62.
- Forsberg, C.-M., Brattström, V., Malmberg, E., & Nord, C. E. (1991). Ligature wires and elastomeric rings: two methods of ligation, and their association with microbial colonization of *Streptococcus mutans* and *lactobacilli*. *The European Journal of Orthodontics*, 13(5), 416-420.
- Fortini, A., Lupoli, M., & Cacciafesta, V. (2005). A new low-friction ligation system. *Journal of Clinical Orthodontics*, 39(8), 464.

- Franchi, L., Baccetti, T., Camporesi, M., & Barbato, E. (2008). Forces released during sliding mechanics with passive self-ligating brackets or nonconventional elastomeric ligatures. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *133*(1), 87-90.
- Frank, C. A., & Nikolai, R. J. (1980). A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. *American journal of orthodontics*, *78*(6), 593-609.
- Frey, H. (2015). Applications and Developments of Thin Film Technology *Handbook of Thin-Film Technology* (pp. 1-3): Springer.
- Frois, A., Cunha, L., & Louro, C. S. (2019). *Functionalization of Orthodontic Alloys with DLC Coatings*. Paper presented at the 2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG).
- Gal, J.-Y., Fovet, Y., & Adib-Yadzi, M. (2001). About a synthetic saliva for in vitro studies. *Talanta*, *53*(6), 1103-1115.
- Gamow, G., & Cleveland, J. M. (1960). *Physics: foundations and frontiers*: Prentice-Hall.
- Garner, L., Allai, W., & Moore, B. (1986). A comparison of frictional forces during simulated canine retraction of a continuous edgewise arch wire. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *90*(3), 199-203.
- Ghafari, J. (1992). Problems associated with ceramic brackets suggest limiting use to selected teeth. *The Angle Orthodontist*, *62*(2), 145-152.
- Goldstein, J. (2012). *Practical scanning electron microscopy: electron and ion microprobe analysis*: Springer Science & Business Media.
- Graber, T. M., Jr, R. L. V., & Vig, K. W. L. (2005). Orthodontics. Current principles & techniques, 4th edition (2005) *Orthodontics: Current Principles & Techniques* (Vol. 28). European Journal of Orthodontics: Elsevier, St Louis, Missouri, USA
- Grill, A. (2003). Diamond-like carbon coatings as biocompatible materials—an overview. *Diamond and Related Materials*, *12*(2), 166-170.
- Gutensohn, K., Beythien, C., Bau, J., Fenner, T., Grewe, P., Koester, R., . . . Kuehnl, P. (2000). In vitro analyses of diamond-like carbon coated stents: reduction of metal ion release, platelet activation, and thrombogenicity. *Thrombosis research*, *99*(6), 577-585.
- Hain, M., Dhopatkar, A., & Rock, P. (2003). The effect of ligation method on friction in sliding mechanics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *123*(4), 416-422.
- Hasebe, T., Matsuoka, Y., Kodama, H., Saito, T., Yohena, S., Kamijo, A., . . . Takahashi, K. (2006). Lubrication performance of diamond-like carbon and fluorinated diamond-like carbon coatings for intravascular guidewires. *Diamond and Related Materials*, *15*(1), 129-132.
- Hauert, R., Thorwarth, K., & Thorwarth, G. (2013). An overview on diamond-like carbon coatings in medical applications. *Surface and Coatings Technology*, *233*, 119-130.
- Hildebrand, H., Blanchemain, N., Mayer, G., Chai, F., Lefebvre, M., & Boschin, F. (2006). Surface coatings for biological activation and functionalization of medical devices. *Surface and Coatings Technology*, *200*(22-23), 6318-6324.
- Ho, K. S., & West, V. C. (1991). Friction resistance between edgewise brackets and archwires. *Australian orthodontic journal*, *12*(2), 95.
- Holmberg, K., & Matthews, A. (1994). Elsevier tribology series, vol. 28 (pp. 172-189): Elsevier, The Netherlands.
- Huang, S., Huang, J., Kang, T., Diao, D., & Duan, Y. (2013). Coating NiTi archwires with diamond-like carbon films: reducing fluoride-induced corrosion and improving frictional properties. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *24*(10), 2287-2292.
- Huang, T.-H., Guo, J.-U., & Kao, C.-T. (2010). A comparison of the friction associated with diamond-like carbon (DLC) or titanium nitride (TiN) plating metal brackets. *Surface and Coatings Technology*, *205*(7), 1917-1921.

- Huang, T., Luk, H.-S., Hsu, Y.-C., & Kao, C.-T. (2011). An in vitro comparison of the frictional forces between archwires and self-ligating brackets of passive and active types. *The European Journal of Orthodontics*, 34(5), 625-632.
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: friction and wear of engineering materials*: Butterworth-Heinemann.
- Ireland, A., Sherriff, M., & McDonald, F. (1991). Effect of bracket and wire composition on frictional forces. *The European Journal of Orthodontics*, 13(4), 322-328.
- Iwasaki, L. R., Beatty, M. W., Randall, C. J., & Nickel, J. C. (2003). Clinical ligation forces and intraoral friction during sliding on a stainless steel archwire. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 123(4), 408-415.
- Javaherdashti, R. (2008). Microbiologically influenced corrosion (MIC). *Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight*, 29-71.
- Jones, S., Tan, C., & Davies, E. (2002). The effects of reconditioning on the slot dimensions and static frictional resistance of stainless steel brackets. *The European Journal of Orthodontics*, 24(2), 183-190.
- Kang, B.-S., Baek, S.-H., Mah, J., & Yang, W.-S. (2003). Three-dimensional relationship between the critical contact angle and the torque angle. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 123(1), 64-73.
- Kang, T., Huang, S.-Y., Huang, J.-J., Li, Q.-H., Diao, D.-F., & Duan, Y.-Z. (2015). The effects of diamond-like carbon films on fretting wear behavior of orthodontic archwire-bracket contacts. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 15(6), 4641-4647.
- Kao, C.-T., Guo, J.-U., & Huang, T.-H. (2011). Comparison of friction force between corroded and noncorroded titanium nitride plating of metal brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139(5), 594-600.
- Kapila, S., Angolkar, P. V., Duncanson Jr, M. G., & Nanda, R. S. (1990). Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(2), 117-126.
- Karabaglar, D. (2015). *Süperkaygan Özellik Gösteren Elmas Benzeri Karbon Nanopartikülleri İle Kaplanmış Ortodontik Tel, Konvansiyonel Braket ve Kendinden Bağlanan Braket Kullanımının Diş Hareketinde Sürtünmeyi Azaltıcı Etkisinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi*. (DOKTORA TEZİ), Marmara Üniversitesi.
- Katsikogianni, M., Spiliopoulou, I., Dowling, D., & Missirlis, Y. (2006). Adhesion of slime producing *Staphylococcus epidermidis* strains to PVC and diamond-like carbon/silver/fluorinated coatings. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 17(8), 679-689.
- Katz, A., Redlich, M., Rapoport, L., Wagner, H., & Tenne, R. (2006). Self-lubricating coatings containing fullerene-like WS<sub>2</sub> nanoparticles for orthodontic wires and other possible medical applications. *Tribology Letters*, 21(2), 135-139.
- Keith, O., Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (1994). Zirconia brackets: an evaluation of morphology and coefficients of friction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(6), 605-614.
- Khamatkar, A., Sonawane, S., Narkhade, S., Gadhiya, N., Bagade, A., Soni, V., & Betigiri, A. (2015). Effects of different ligature materials on friction in sliding mechanics. *Journal of international oral health: JIOH*, 7(5), 34.
- Khambay, B., Millett, D., & McHugh, S. (2005). Archwire seating forces produced by different ligation methods and their effect on frictional resistance. *Eur J Orthod*, 27(3), 302-308. doi: 10.1093/ejo/cji008
- Kim, S., Lee, J., Koak, J., Heo, S., Lee, K., Cho, L., & Lee, S. (2005). An abutment screw loosening study of a Diamond Like Carbon-coated CP titanium implant. *Journal of oral rehabilitation*, 32(5), 346-350.



- Kobayashi, S., Ohgoe, Y., Ozeki, K., Hirakuri, K., & Aoki, H. (2007). Dissolution effect and cytotoxicity of diamond-like carbon coatings on orthodontic archwires. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 18(12), 2263-2268.
- Kobayashi, S., Ohgoe, Y., Ozeki, K., Sato, K., Sumiya, T., Hirakuri, K. K., & Aoki, H. (2005). Diamond-like carbon coatings on orthodontic archwires. *Diamond and Related Materials*, 14(3-7), 1094-1097.
- Kohli, R. (2012). Methods for monitoring and measuring cleanliness of surfaces *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (pp. 107-178): Elsevier.
- Kojima, Y., & Fukui, H. (2005). Numerical simulation of canine retraction by sliding mechanics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 127(5), 542-551.
- Kusy, & Whitley. (1997). *Friction between different wire-bracket configurations and materials*. Paper presented at the Seminars in Orthodontics.
- Kusy, R., Tobin, E., Whitley, J., & Sioshansi, P. (1992). Frictional coefficients of ion-implanted alumina against ion-implanted beta-titanium in the low load, low velocity, single pass regime. *Dental Materials*, 8(3), 167-172.
- Kusy, R., & Whitley, J. (1989). Effects of sliding velocity on the coefficients of friction in a model orthodontic system. *Dental Materials*, 5(4), 235-240.
- Kusy, R., Whitley, J., Ambrose, W., & Newman, J. (1998). Evaluation of titanium brackets for orthodontic treatment: part I. The passive configuration. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 114(5), 558-572.
- Kusy, R., & Whitley, J. Q. (1990). Coefficients of friction for arch wires in stainless steel and polycrystalline alumina bracket slots. I. The dry state. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(4), 300-312.
- Kusy, R. P. (1988). Morphology of polycrystalline alumina brackets and its relationship to fracture toughness and strength. *The Angle Orthodontist*, 58(3), 197-203.
- Kusy, R. P. (1997). A review of contemporary archwires: their properties and characteristics. *The Angle Orthodontist*, 67(3), 197-207.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (1990). Effects of surface roughness on the coefficients of friction in model orthodontic systems. *Journal of Biomechanics*, 23(9), 913-925.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (1997). *Friction between different wire-bracket configurations and materials*. Paper presented at the Seminars in Orthodontics.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (1999). Influence of archwire and bracket dimensions on sliding mechanics: derivations and determinations of the critical contact angles for binding. *The European Journal of Orthodontics*, 21(2), 199-208.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (2000). Resistance to sliding of orthodontic appliances in the dry and wet states: influence of archwire alloy, interbracket distance, and bracket engagement. *Journal of biomedical materials research*, 52(4), 797-811.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (2001). Frictional resistances of metal-lined ceramic brackets versus conventional stainless steel brackets and development of 3-D friction maps. *The Angle Orthodontist*, 71(5), 364-374.
- Kusy, R. P., & Whitley, J. Q. (2003). *Influence of fluid media on the frictional coefficients in orthodontic sliding*. Paper presented at the Seminars in Orthodontics.
- Kusy, R. P., Whitley, J. Q., & Prewitt, M. J. (1991). Comparison of the frictional coefficients for selected archwire-bracket slot combinations in the dry and wet states. *The Angle Orthodontist*, 61(4), 293-302.
- LaVan, D. A., Padera, R. F., Friedmann, T. A., Sullivan, J. P., Langer, R., & Kohane, D. S. (2005). In vivo evaluation of tetrahedral amorphous carbon. *Biomaterials*, 26(5), 465-473.
- Lee, G.-J., Park, K.-H., Park, Y.-G., & Park, H.-K. (2010). A quantitative AFM analysis of nano-scale surface roughness in various orthodontic brackets. *Micron*, 41(7), 775-782.

- Leite, V. V., Lopes, M. B., Gonini Júnior, A., Almeida, M. R. d., Moura, S. K., & Almeida, R. R. d. (2014). Comparison of frictional resistance between self-ligating and conventional brackets tied with elastomeric and metal ligature in orthodontic archwires. *Dental Press Journal of Orthodontics*, *19*(3), 114-119.
- Lima, V. N. C., Coimbra, M. E. R., Derech, C. D. A., & Ruellas, A. C. d. O. (2010). Frictional forces in stainless steel and plastic brackets using four types of wire ligation. *Dental Press Journal of Orthodontics*, *15*(2), 82-86.
- Linder, S., Pinkowski, W., & Aepfelbacher, M. (2002). Adhesion, cytoskeletal architecture and activation status of primary human macrophages on a diamond-like carbon coated surface. *Biomaterials*, *23*(3), 767-773.
- Liu, X., Chu, P. K., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *47*(3-4), 49-121.
- Loftus, B. P., Ârtun, J., Nicholls, J. I., Alonzo, T. A., & Stoner, J. A. (1999). Evaluation of friction during sliding tooth movement in various bracket-arch wire combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *116*(3), 336-345.
- Ma, G., Lin, G., Sun, G., Zhang, H., & Wu, H. (2011). Characteristics of DLC containing Ti and Zr films deposited by reactive magnetron sputtering. *Physics Procedia*, *18*, 9-15.
- Maguire, P., McLaughlin, J., Okpalugo, T., Lemoine, P., Papakonstantinou, P., McAdams, E., . . . Abbas, G. (2005). Mechanical stability, corrosion performance and bioresponse of amorphous diamond-like carbon for medical stents and guidewires. *Diamond and Related Materials*, *14*(8), 1277-1288.
- Makhlouf, A. (2011). Current and advanced coating technologies for industrial applications *Nanocoatings and Ultra-Thin Films* (pp. 3-23): Elsevier.
- Marques, I. S. V., Araújo, A. M., Gurgel, J. A., & Normando, D. (2010). Debris, roughness and friction of stainless steel archwires following clinical use. *Angle Orthodontist*, *80*(3), 521-527.
- Michelberger, D. J. (1999). An investigation of the friction, wear and corrosion properties of orthodontic appliances.
- Michelberger, D. J., Eadie, R. L., Faulkner, M. G., Glover, K. E., Prasad, N. G., & Major, P. W. (2000). The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, *118*(6), 662-674. doi: 10.1067/mod.2000.105529
- Monteiro, M. R. G., SILVA, L. E. d., Elias, C. N., & Vilella, O. d. V. (2014). Frictional resistance of self-ligating versus conventional brackets in different bracket-archwire-angle combinations. *Journal of Applied Oral Science*, *22*(3), 228-234.
- Moore, M., Harrington, E., & Rock, W. (2004). Factors affecting friction in the pre-adjusted appliance. *The European Journal of Orthodontics*, *26*(6), 579-583.
- Muguruma, T., Iijima, M., Brantley, W. A., & Mizoguchi, I. (2011). Effects of a diamond-like carbon coating on the frictional properties of orthodontic wires. *The Angle Orthodontist*, *81*(1), 141-148.
- Muguruma, T., Iijima, M., Brantley, W. A., Nakagaki, S., Endo, K., & Mizoguchi, I. (2011). Frictional and mechanical properties of diamond-like carbon-coated orthodontic brackets. *The European Journal of Orthodontics*, *35*(2), 216-222.
- Muguruma, T., Iijima, M., Kawaguchi, M., & Mizoguchi, I. (2018). Effects of sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> ratio and hydrogen content on in vitro bending and frictional performance of DLC-coated orthodontic stainless steels. *Coatings*, *8*(6), 199.
- Muguruma, T., Iijima, M., Yuasa, T., Kawaguchi, K., & Mizoguchi, I. (2017). Characterization of the coatings covering esthetic orthodontic archwires and their influence on the bending and frictional properties. *The Angle Orthodontist*, *87*(4), 610-617.

- Nanda, R. (1997). *Biomechanics in clinical orthodontics*: WB Saunders company.
- Nanda, R., & Ghosh, J. (1997). Biomechanical considerations in sliding mechanics. *Biomechanics in clinical orthodontics. Philadelphia, PA: WB Saunders*, 188-217.
- Nikolai, R. J. (1985). *Bioengineering analysis of orthodontic mechanics*. : Philadelphia, Lea & Febiger.
- Nishio, C., da Motta, A. F. J., Elias, C. N., & Mucha, J. N. (2004). In vitro evaluation of frictional forces between archwires and ceramic brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 125(1), 56-64.
- Normando, D., Araújo, A. M. d., Marques, I. d. S. V., Barroso Tavares Dias, C. G., & Miguel, J. A. M. (2011). Archwire cleaning after intraoral ageing: the effects on debris, roughness, and friction. *The European Journal of Orthodontics*, 35(2), 223-229.
- O'Connor, D. J., Sexton, B. A., & Smart, R. S. (2013). *Surface analysis methods in materials science* (Vol. 23): Springer Science & Business Media.
- Ogata, R. H., Nanda, R. S., Duncanson Jr, M. G., Sinha, P. K., & Currier, G. F. (1996). Frictional resistances in stainless steel bracket-wire combinations with effects of vertical deflections. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 109(5), 535-542.
- Ohgoe, Y., Kobayashi, S., Ozeki, K., Aoki, H., Nakamori, H., Hirakuri, K. K., & Miyashita, O. (2006). Reduction effect of nickel ion release on a diamond-like carbon film coated onto an orthodontic archwire. *Thin Solid Films*, 497(1-2), 218-222.
- Okpalugo, T., McKenna, E., Magee, A., McLaughlin, J., & Brown, N. (2004). The MTT assays of bovine retinal pericytes and human microvascular endothelial cells on DLC and Si-DLC-coated TCPS. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 71(2), 201-208.
- Omana, H. M. (1992). Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J. Clin. Orthod.*, 26, 425-432.
- Pacheco, M. R., Jansen, W. C., & Oliveira, D. D. (2012). The role of friction in orthodontics. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 17(2), 170-177.
- Peck, S. (2001). Orthodontic slot size: it's time to retool.
- Peterson, L. (1982). A comparison of friction resistance for Nitinol and stainless steel wire in edgewise brackets. *Quintessence International*, 5, 563-571.
- Phukaoluan, A., Khantachawana, A., Kaewtatip, P., Dechkunakorn, S., Anuwongnukroh, N., Santiwong, P., & Kajornchaiyakul, J. (2017). Comparison of friction forces between stainless orthodontic steel brackets and TiNi wires in wet and dry conditions. *International orthodontics*, 15(1), 13-24.
- Pier-Francesco, A., Adams, R. J., Waters, M. G., & Williams, D. W. (2006). Titanium surface modification and its effect on the adherence of *Porphyromonas gingivalis*: an in vitro study. *Clinical oral implants research*, 17(6), 633-637.
- Pizzoni, L., Ravnholt, G., & Melsen, B. (1998). Frictional forces related to self-ligating brackets. *The European Journal of Orthodontics*, 20(3), 283-291.
- Pratten, D. H., Popli, K., Germane, N., & Gunsolley, J. C. (1990). Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(5), 398-403.
- Proffit, W. (2013). *Contemporary Orthodontics* 5th edition, St. Louis, MO: Elsevier, Mosby.
- Prosocki, R. R., Bagby, M. D., & Erickson, L. C. (1991). Static frictional force and surface roughness of nickel-titanium arch wires. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 100(4), 341-348.
- Quiryrenen, M., Bollen, C. M., Papaioannou, W., Van Eldere, J., & van Steenberghe, D. (1996). The influence of titanium abutment surface roughness on plaque accumulation and

- gingivitis: Short-term observations. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 11(2).
- Read-Ward, G., Jones, S., & Davies, E. (1997). A comparison of self-ligating and conventional orthodontic bracket systems. *British journal of orthodontics*, 24(4), 309-317.
- Redlich, M., Katz, A., Rapoport, L., Wagner, H., Feldman, Y., & Tenne, R. (2008). Improved orthodontic stainless steel wires coated with inorganic fullerene-like nanoparticles of WS<sub>2</sub> impregnated in electroless nickel–phosphorous film. *Dental Materials*, 24(12), 1640-1646.
- Redlich, M., Mayer, Y., Harari, D., & Lewinstein, I. (2003). In vitro study of frictional forces during sliding mechanics of “reduced-friction” brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(1), 69-73.
- Redlich, M., & Tenne, R. (2013). Nanoparticle coating of orthodontic appliances for friction reduction *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry* (pp. 260-262): Elsevier.
- Riley, J. (1979). Frictional forces of ligated plastic and metal edgewise brackets. *J Dent Res*, 58, A21.
- Rimondini, L., Farè, S., Brambilla, E., Felloni, A., Consonni, C., Brossa, F., & Carrassi, A. (1997). The effect of surface roughness on early in vivo plaque colonization on titanium. *Journal of periodontology*, 68(6), 556-562.
- Russell, J. (2005). Current products and practice: aesthetic orthodontic brackets. *Journal of Orthodontics*, 32(2), 146-163.
- Saunders, C., & Kusy, R. P. (1994). Surface topography and frictional characteristics of ceramic brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(1), 76-87.
- Schlegel, V. (1996). Relative friction minimization in fixed orthodontic bracket appliances. *Journal of Biomechanics*, 29(4), 483-491.
- Schudy, G. F., & Schudy, F. F. (1989). Intrabacket space and interbracket distance: critical factors in clinical orthodontics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(4), 281-294.
- Singh, G. (2015). *Textbook of orthodontics*: JP Medical Ltd.
- Sleptsov, V., Elinson, V., Simakina, N., Laymin, A., Tsygankov, I., Kivaev, A., & Musina, A. (1996). Ophthalmological application of contact lenses modified by means of ion-assisted carbon films. *Diamond and Related Materials*, 5(3-5), 483-485.
- Stannard, J. G., Gau, J. M., & Hanna, M. A. (1986). Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. *American journal of orthodontics*, 89(6), 485-491.
- Sugisawa, H., Kitaura, H., Ueda, K., Kimura, K., Ishida, M., Ochi, Y., . . . Takano-Yamamoto, T. (2018). Corrosion resistance and mechanical properties of titanium nitride plating on orthodontic wires. *Dental materials journal*, 37(2), 286-292.
- Tanne, K., Matsubara, S., Hotei, Y., Sakuda, M., & Yoshida, M. (1994). Frictional forces and surface topography of a new ceramic bracket. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(3), 273-278.
- Tantiwinyupong, N., Chintavalakorn, R., Santiwong, P., & Khantachawana, A. (2019). *Frictional and Mechanical Properties of Surface Modified Nickel-Titanium Orthodontic Archwires*. Paper presented at the Key Engineering Materials.
- Taylor, N. G., & Ison, K. (1996). Frictional resistance between orthodontic brackets and archwires in the buccal segments. *The Angle Orthodontist*, 66(3), 215-222.
- Thorstenson, G. A., & Kusy, R. P. (2001). Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet (saliva) states. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 120(4), 361-370.

- Tidy, D., & Orth, D. (1989). Frictional forces in fixed appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(3), 249-254.
- Tosun, Y. (1999). Sabit Ortodontik Apareylerin Biyomekanik Prensipleri. *Ege Ün. Basımevi, İzmir*.
- Tselepis, M., Brockhurst, P., & West, V. C. (1994). The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(2), 131-138.
- Usui, T., Iwata, T., Miyake, S., Otsuka, T., Koizumi, S., Shirakawa, N., & Kawata, T. (2018). Mechanical and frictional properties of aesthetic orthodontic wires obtained by hard chrome carbide plating. *Journal of Dental Sciences*, 13(2), 151-159.
- Vaughan, J. L., Duncanson Jr, M. G., Nanda, R. S., & Currier, G. F. (1995). Relative kinetic frictional forces between sintered stainless steel brackets and orthodontic wires. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 107(1), 20-27.
- Vickerman, J. C., & Gilmore, I. S. (2011). *Surface analysis: the principal techniques*: John Wiley & Sons.
- Wong, A. K. (1976). Orthodontic elastic materials. *The Angle Orthodontist*, 46(2), 196-205.
- Wongsarat, W., Sarapirom, S., Aukkaravittayapun, S., Jotikasthira, D., Boonyawan, D., & Yu, L. (2012). Plasma immersion ion implantation and deposition of DLC coating for modification of orthodontic magnets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 272, 346-350.
- Woodside, D., Berger, J., & Hanson, G. (2005). Self-ligation orthodontics with the SPEED appliance. *Orthodontics: current principles and techniques*. St. Louis, MO, Elsevier Mosby, 717-752.
- Wright, D., Gallant, R., & Spangberg, L. (1982). Correlation of corrosion behavior and cytotoxicity in Au-Cu-Ag ternary alloys *Precious Metals 1981* (pp. 433-441): Elsevier.
- Yamaguchi, K., Nanda, R. S., Morimoto, N., & Oda, Y. (1996). A study of force application, amount of retarding force, and bracket width in sliding mechanics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 109(1), 50-56.
- Yan, Y. (2010). Tribology and tribo-corrosion testing and analysis of metallic biomaterials *Metals for Biomedical Devices* (pp. 178-201): Elsevier.
- Yang, P., Kwok, S., Chu, P., Leng, Y., Chen, J., Wang, J., & Huang, N. (2003). Haemocompatibility of hydrogenated amorphous carbon (aC: H) films synthesized by plasma immersion ion implantation-deposition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 206, 721-725.
- Young, J., & SANDRIK, J. L. (1979). The influence of preloading on stress relaxation of orthodontic elastic polymers. *The Angle Orthodontist*, 49(2), 104-109.
- Zhang, H., Guo, S., Wang, D., Zhou, T., Wang, L., & Ma, J. (2016). Effects of nanostructured, diamondlike, carbon coating and nitrocarburizing on the frictional properties and biocompatibility of orthodontic stainless steel wires. *The Angle Orthodontist*, 86(5), 782-788.

## 8. ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Hikmetnur DANIŞMAN

**Doğum Tarihi:** 19.10.1991

**Doğum Yeri:** Kayseri

**Uyruğu:** T.C.

**Adres:** Gaziosmanpaşa Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Ortodonti Ana Bilim Dalı, TOKAT

**E-mail:** hnurdanisman@gmail.com

### EĞİTİM BİLGİLERİ

**Lise:** Nuh Mehmet Küçükçalık Anadolu Lisesi / KAYSERİ (2009)

**Üniversite:** Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi / KAYSERİ (2014)

**Yabancı Dil:** İngilizce