

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ
ORTODONTİ ANA BİLİM DALI



FARKLI BEYAZLATMA AJANLARININ METAL
BRAKETLERİN İYON SALINIMINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

UZMANLIK TEZİ

ELİF ÖNER GÖKSU

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Musa BULUT

BOLU, EKİM 2025

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ
Tez Onay Belgesi

Tezin Başlığı : FARKLI BEYAZLATMA AJANLARININ
METAL BRAKETLERİN İYON SALINIMINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tezin Savunma Tarihi : 20.10.2025

Tezin Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Musa BULUT

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Orhan ÇİÇEK

Üye : Doç. Dr. Yasemin Nur KORKMAZ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Musa BULUT

DEKANLIK ONAYI

Bu tez Uzmanlık Tezi standartlarına uygun bulunmuştur.

Prof. Dr. Ali KELEŞ

DEKAN

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....
ELİF ÖNER GÖKSU

ÖZET

FARKLI BEYAZLATMA AJANLARININ METAL BRAKETLERİN İYON SALINIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

UZMANLIK TEZİ

ELİF ÖNER GÖKSU

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

ORTODONTİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSA BULUT)

BOLU, EKİM - 2025

XII + 99 sayfa

Bu in-vitro deneysel çalışmada, ofis tipi beyazlatma ajanlarına maruz bırakılan farklı üreticilere ait paslanmaz çelik ortodontik braketlerden salınan metal iyon miktarları değerlendirilmiştir. Üç farklı üreticiye ait toplam 90 adet MBT reçeteli (0.022 slot) paslanmaz çelik braket, %40 hidrojen peroksit (HP), %45 karbamid peroksit (KP) ve yapay tükürük (kontrol) olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Braketler, 0,5 mL beyazlatma solüsyonunda 40 dakika bekletildikten sonra 10 mL yapay tükürüğe aktarılmış ve 37 °C’de 28 gün süreyle bekletilmiştir. Dokuz metal iyonu (nikel, krom, kobalt, stronsiyum, bakır, çinko, titanyum, kurşun, kadmiyum) salınımı (µg/L) İndüktif Eşleşmiş Plazma–Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile kantitatif olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler non-parametrik testler kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İyon salınımının hem kullanılan beyazlatıcı ajanın türüne hem de braketlere göre değiştiğini göstermiştir. Hidrojen peroksit (HP) ve karbamid peroksit (KP) solüsyonları yapay tükürük koşullarına göre genel olarak daha fazla iyon salınımına neden olmuştur. American Orthodontics™ Mini Master braketler kobalt, krom, bakır, stronsiyum, titanyum, kurşun ve kadmiyum metallerinde en yüksek salınımı gösterirken; çinko iyonunda en düşük salınımı gösteren grup olmuştur. Dentaureum™ Discovery Smart braketler çalışmada kullanılan iyonların hiçbirinde en yüksek değeri göstermezken; nikel, krom, bakır, stronsiyum, titanyum, kurşun ve kadmiyum metallerinde en düşük salınımı göstermiştir. 3M Unitek™ Solventum braketler nikel ve çinko iyonlarında en yüksek; kobalt iyonunda en düşük salınımı göstermiştir. Kullanılan braket tipi ve solüsyon türüne bağlı olarak salınım miktarlarında anlamlı farklar gözlenmiştir ($p<0.005$). Sonuçlar, materyal ve solüsyon etkileşiminin biyouyumluluk açısından klinik olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Paslanmaz çelik braketler, Ofis tipi beyazlatma ajanları, Metal iyon salınımı, ICP-OES

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT BLEACHING AGENTS ON ION RELEASE FROM METAL BRACKETS

SPECIALITY THESIS IN ORTHODONTICS

ELIF ONER GOKSU

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF ORTHODONTICS

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MUSA BULUT)

BOLU, OCTOBER 2025

XII + 99 pages

This in-vitro experimental study aimed to evaluate the amount of metal ion release from stainless steel orthodontic brackets produced by different manufacturers after exposure to in-office bleaching agents. A total of 90 MBT prescription (0.022" slot) stainless steel brackets from three different manufacturers were divided into three groups: 40% hydrogen peroxide (HP), 45% carbamide peroxide (CP), and artificial saliva (control). Brackets were immersed in 0.5 mL of bleaching solution for 40 minutes, then transferred to 10 mL of artificial saliva and incubated at 37 °C for 28 days. The release of nine metal ions (nickel, chromium, cobalt, strontium, copper, zinc, titanium, lead, cadmium) was quantitatively analyzed using Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Data were statistically analyzed using non-parametric tests. The amount of ion release varied depending on both the type of bleaching agent used and the bracket brand. Hydrogen peroxide (HP) and carbamide peroxide (CP) solutions caused higher ion release compared to artificial saliva. American Orthodontics™ Mini Master brackets exhibited the highest release of cobalt, chromium, copper, strontium, titanium, lead, and cadmium, while showing the lowest release for zinc. Dentaureum™ Discovery Smart brackets did not exhibit the highest release for any ion and showed the lowest release of nickel, chromium, copper, strontium, titanium, lead, and cadmium. 3M Unitek™ Solventum brackets showed the highest release of nickel and zinc, and the lowest release of cobalt. Significant differences were observed in ion release depending on bracket type and bleaching solution ($p < 0.005$). The findings indicate that the interaction between material and bleaching agent should be clinically considered.

KEYWORDS: Stainless steel brackets, In-office bleaching agents, Metal ion release, ICP-OES

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
FOTOĞRAF LİSTESİ.....	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	x
TEŞEKKÜR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Ortodontik Braketlerin Çeşitleri	4
2.1.1 Metal Braketler	4
2.1.2 Plastik Braketler.....	7
2.1.3 Seramik Braketler	7
2.2 Korozyon.....	8
2.2.1 Korozyonun Tanımı ve Ortodontik Materyallerde Önemi.....	8
2.2.2 Korozyon Türleri	9
2.2.3 Ortodontik Açıdan Korozyonu Etkileyen Faktörler	10
2.2.4 Braketlerin Yapımında Kullanılan Teknikler	11
2.2.5 Paslanmaz Çelik Braketlerde Korozyon ve Üretim Sürecinin Etkileri	14
2.2.6 Ortodontik tedavide korozyondan korunma yöntemleri	15
2.3 Ortodontik Materyallerde İyon Salınımı ve Biyolojik Etkileri	16
2.3.1 Tükürüğün Kompozisyonu ve Fonksiyonları.....	18
2.3.2 Tükürüğün pH Düzeyinin Ortodontik Materyaller Üzerindeki Etkisi	19
2.3.3 İyon Salınımı Ölçüm Yöntemleri	19
2.4 Beyazlatma (Bleaching)	22
2.5 Diş Beyazlatmanın Mekanizması	24
2.5.1 Beyazlatma Yöntemleri.....	25
2.5.2 Klinik Uygulamada Kullanılan Beyazlatıcı Ajanlar	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1 Araştırmada Kullanılan Braketler	29
3.2 Beyazlatma ajanları.....	29
3.3 Yapay Tükürük Çözeltisi	30
3.3.1 Yapay Tükürüğün İçeriği ve Hazırlanması	30
3.4 Numunelerin Hazırlanması	31
3.5 Örneklerin Analiz İçin Hazırlanması	36

3.6 ICP-OES Analiz Protokolü ve Kalibrasyon Süreci	37
3.7 Kalite Kontrol ve Ölçüm Güvenirliği	38
3.8 Tespit ve Tayin Limitlerinin Belirlenmesi	38
3.9 İstatistiksel Analiz	39
4. BULGULAR.....	40
4.1 Ni Bulguları.....	40
4.2 Co Bulguları	43
4.3 Cr Bulguları.....	45
4.4 Cu Bulguları	48
4.5 Sr Bulguları	50
4.6 Zn Bulguları	52
4.7 Ti Bulguları	54
4.8 Pb Bulguları.....	56
4.9 Cd Bulguları	58
5. TARTIŞMA	60
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	82

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1	Materyal ve solüsyon gruplarına göre Ni ($\mu\text{g/L}$) düzeylerinin ortanca ve ortalama değerlerle karşılaştırılması.....	42
Tablo 4.2	Materyal ve solüsyon gruplarına göre Co ($\mu\text{g/L}$) ortanca değerlerinin karşılaştırılması.....	44
Tablo 4.3	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cr ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	47
Tablo 4.4	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cu ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	49
Tablo 4.5	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Sr ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	51
Tablo 4.6	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Zn ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Tablo 4.7	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Ti ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Tablo 4.8	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Pb ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	57
Tablo 4.9	Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cd ($\mu\text{g/L}$) değerlerinin karşılaştırılması.....	59

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1 Bu çalışmada kullanılan iki farklı beyazlatma ajanı: A) %45 KP içeren Opalescence Quick PF ve B) %40 HP içeren Opalescence Boost.	30
Fotoğraf 3.2 Analiz öncesinde deneysel gruplarda kullanılmak üzere hazırlanan steril Eppendorf tüpleri.	31
Fotoğraf 3.3 Beyazlatma ajanının Eppendorf tüplerine transfer edilme sürecinden bir görüntü.	32
Fotoğraf 3.4 Braketlerin 40 dakika boyunca bekletileceği beyazlatma ajanları ile doldurulmuş, kapatılmış Eppendorf tüpleri.	33
Fotoğraf 3.5 Braketlerin beyazlatma ajanı içerisinde konumlandırıldığı, jel formundaki beyazlatıcı ile çevrelendiği tüplerin yakın plan görünümü.	34
Fotoğraf 3.6 Beyazlatma işlemi sonrasında bekletme süreci için yapay tükürük içeren Falcon tüplerinin iki farklı açıdan görünümü.	35
Fotoğraf 3.7 Bekletme süresi boyunca numunelerin 37°C’de inkübasyona tabi tutulduğu inkübatör iç yerleşimi.	36
Fotoğraf 3.8 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry) cihazı ile örneklerdeki metal iyonlarının konsantrasyonlarının tayin edildiği analiz ünitesi.	38

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

%	: Yüzde
3M	: 3M Unitek
AAS	: Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
AO	: American Orthodontics
AISI	: American Iron and Steel Institute
BAİBÜ	: Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
β-Ti	: Beta Titanyum alaşımı
CaCl₂	: Kalsiyum Klorür
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
Cd	: Kadmiyum
CIM	: Seramik Enjeksiyonla Kalıplama Tekniği
Co	: Kobalt
Co-Cr	: Kobalt–Krom alaşımı
cps	: Counts per Second (Saniye Başına Sayım)
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
D	: Dentaaurum
DLC	: Elmas Benzeri Karbon Kaplamalar
ETAAS	: Elektrotermal Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
FAAS	: Alevli Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
GC	: Gaz Kromatografisi
HNO₃	: Nitrik Asit
HP	: Hidrojen Peroksit
ICP-MS	: Endüktif Eşleşmiş Plazma – Kütle Spektrometrisi
ICP-OES	: Endüktif Eşleşmiş Plazma – Optik Emisyon Spektrometresi
KH₂PO₄	: Potasyum Dihidrojen Fosfat
KCl	: Potasyum Klorür
KP	: Karbamid Peroksit
LC	: Sıvı Kromatografisi
LOD	: Limit of Detection (Tespit Limiti)
LOQ	: Limit of Quantification (Tayin Limiti)
MBT	: McLaughlin-Bennett-Trevisi (ortodontik braket reçetesi)
MIM	: Metal Enjeksiyonla Kalıplama
Ni	: Nikel
Ni-Ti	: Nikel–Titanyum alaşımı
Pb	: Kurşun

PIM	: Plastik Enjeksiyonla Kalıplama Tekniği
Ppm	: Parts per Million (Milyonda Birim)
ppb	: Parts per Billion (Milyarda Birim)
Sr	: Stronsiyum
Ti	: Titanyum
TLC	: İnce Tabaka Kromatografisi
Zn	: Çinko
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında iyi niyeti, yardımseverliği ve ilgisiyle bana yol gösteren, klinikte yaşadığım her sorunu çekinmeden danışabildiğim yol gösterici yaklaşımıyla bana daima destek olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Musa BULUT’a teşekkürlerimi sunarım.

Uzmanlık sürecim boyunca bilgi ve tecrübesiyle bizlere yol gösteren, hasta takibinde ve klinik yaklaşımda örnek aldığım değerli hocam Doç. Dr. Yasemin Nur KORKMAZ’a yönlendirici katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kibar, anlayışlı ve öğretici yaklaşımıyla yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Semiha ARSLAN’a teşekkür ederim.

Bilgisi, tecrübesi, yardımseverliği ve içtenliğiyle her zaman yanımda olan, bizlere yol gösteren Doç. Dr. Yasin HEZENCİ’ye teşekkür ederim.

Eğitim sürecimde yollarımızın kesiştiği ve tanımaktan mutluluk duyduğum Dr. Öğr. Üyesi Aybüke Asena ATASEVEN İŞLER’e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Zorlu uzmanlık süreci boyunca dostluklarıyla yanımda olan, birlikte sayısız anı paylaştığım ve her zaman yanımda hissettiğim değerli arkadaşlarım Gamze BOZKURT KAHRAMANER ve Şeyma YILMAZ’a teşekkürlerimi sunarım.

Dört yıl boyunca omuz omuza çalıştığım, bu süreci unutulmaz kılan eş kıdemli arkadaşlarıma samimi dostlukları için ve diğer tüm asistan arkadaşlarıma güzel paylaşımları için teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi her konuda yanımda olan, bana her zaman yön gösteren ve destekleriyle yolumu aydınlatan sevgili annem Gülay ÖNER ve babam Mehmet ÖNER’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yol göstericim olan, eğitim hayatım boyunca örnek aldığım ve sonunda aynı mesleği paylaştığım abim Kaan ÖNER’e teşekkür ederim.

Uzmanlık eğitimime başladığım ilk günden bu yana hayatımda olan, bu süreci birlikte geçirdiğimiz, yoğun tempoya, stresli dönemlere ve tüm zorluklara rağmen her zaman yanımda duran, bu yolculuğu benim için daha anlamlı ve unutulmaz kılan sevgili eşim Hüseyin Çağlar GÖKSU’ya kalpten teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Ortodontik tedavi, yalnızca dişlerin hizalanmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda estetik ve fonksiyonel iyileşme sunan önemli bir süreçtir. Tedavide kullanılan braketler, tedavi başarısının kritik bileşenlerinden biri olup, paslanmaz çelik braketler yaygın olarak tercih edilen materyaller arasında yer almaktadır. Yüksek mukavemet, esneklik, biyouyumluluk ve dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde, bu braketler ortodontik uygulamalarda uzun ömürlü bir seçenek sunmaktadır. Paslanmaz çelik, yapısında genellikle %8-12 oranında nikel (Ni) ve %18-22 oranında krom (Cr) barındıran bir alaşımdır. Bu bileşenler, paslanmaz çeliğin ortodontik tedavilerde güvenilir bir materyal olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Staffolani ve ark., 1999). Ancak, ağız ortamındaki sürekli maruziyet ve biyokimyasal etkileşimler, zamanla bu metallerin iyon salınımına neden olabilir. Bu durum, özellikle uzun süreli tedavilerde biyolojik güvenlik açısından değerlendirilmesi gereken bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Paslanmaz çelik braketlerden salınan Ni ve Cr iyonlarının, bazı bireylerde alerjik reaksiyonlar ve toksik etkiler oluşturabileceği bildirilmiştir (Mikulewicz ve ark., 2012).

Dental alaşımlardan salınan metal iyonlarının türü ve yoğunluğu, biyolojik sistemler üzerinde çeşitli olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Huang ve ark., 2003). Özellikle, diş yüzeyinde meydana gelen renk değişimlerinin bu iyon salınımı ile ilişkili olduğu kabul edilmektedir (Gwinnett, 1982; R. Maijer & D. C. Smith, 1986). Ortama salınan metalik iyonlar, bazı bireylerde alerjik kontakt dermatit, toksikolojik tepkimeler ve mutajenik etkiler gibi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Bishara ve ark., 1993; Menezes ve ark., 2007). Bununla birlikte, çeşitli araştırmalar, Ni ve Cr iyonlarının uzun süreli maruziyetinde kanser riski ile ilişkili olabileceğini ortaya koymuştur (Faccioni ve ark., 2003; Kerosuo ve ark., 1996; Menezes ve ark., 2007).

Literatürde Ni elementinin olası yan etkileri ile ilgili çeşitli bulgular mevcuttur (Kerosuo ve ark., 1996; Noble ve ark., 2008). Ni'nin, diğer metal elementlere kıyasla daha fazla toksik ve alerjik reaksiyona neden olabileceği bildirilmiştir (McKay ve ark., 1996). Özellikle bazı araştırmalar, Ni-Ti (nikel-titanyum) bazlı ortodontik tedaviler sonrası, daha önce Ni duyarlılığı olmayan bireylerde bu metale karşı hassasiyet gelişebileceğini ortaya koymuştur (Noble ve ark., 2008).

Bunun yanı sıra, kimyasal formu, maruziyet süresi, konsantrasyonu ve temas yolu gibi faktörlere bağlı olarak, Ni'nin sitotoksik, immünojenik, mutajenik ve karsinojenik etkiler gösterebileceğine dair in-vitro çalışmalar bulunmaktadır (Fernandez-Minano ve ark., 2011; Simonsen ve ark., 2011).

Ortodontik tedavi sürecinde diş renklenmesi sık rastlanan bir durum olup, bu durum hasta memnuniyetsizliğine ve şikayetlerine neden olabilmektedir (Abdulkareem, 2014; Trakyalı ve ark., 2009). Ortodontik tedavi gören birçok hasta, dişlerini beyazlatma isteğinde bulunmasına rağmen (Slack ve ark., 2013), genellikle bu işlemin tedavi tamamlandıktan ve braketler çıkarıldıktan sonra yapılması gerektiği düşünülmektedir (Arboleda-Lopez ve ark., 2015). Ortodontik tedavi sırasında beyazlatma işleminin uygulanamayacağı yönündeki yaygın inanış, braketlerin dişlerin labial yüzeyinde yer almasının beyazlatıcı ajanların difüzyonunu engelleyeceği düşüncesine dayanmaktadır (Consolaro ve ark., 2013; Lunardi & Correr, 2014). Ancak, son çalışmalar, ortodontik tedavi sürecinde beyazlatma işleminin uygulanabileceğini ve tatmin edici sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir (Arboleda-Lopez ve ark., 2015; E. Jadad ve ark., 2011).

Haywood ve arkadaşları (Haywood ve ark., 1990), beyazlatıcı ajanların yalnızca doğrudan uygulandıkları bölgede değil, mevcut restorasyonların altından yanlara doğru difüze olabildiğini raporlamışlardır. Daha yakın tarihli araştırmalar da HP ve parçalanma ürünlerinin, sabit ortodontik apareyler bulunmasına rağmen diş yapısına yanlardan nüfuz edebildiğini ortaya koymuştur (Dezotti ve ark., 2002; Kwon & Wertz, 2015).

Bu çalışmanın amacı, farklı markalara ait paslanmaz çelik braketlerin, ofis beyazlatma solüsyonlarında yaptığı iyon salınımını karşılaştırmaktır. Çalışmada, hidrojen peroksit (HP) ve karbamid peroksit (KP) olmak üzere iki farklı beyazlatma ajanı kullanılmış olup ve bu ajanların braketler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, ortodontik tedavi sırasında beyazlatma ajanlarının kullanımının, braketlerin biyouyumluluğunu nasıl etkilediğini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Literatürde bu alandaki çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, bu araştırma, ortodontik tedavi sırasında beyazlatma işlemlerinin güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için gerekli bilgileri sunmayı hedeflemektedir. Çalışma, beyazlatma ajanlarının braketler üzerindeki etkilerini inceleyerek, klinik

uygulamalara yönelik daha güvenli ve etkili yöntemlerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Ortodontik Braketlerin Çeşitleri

Sabit ortodontik tedavilerde dişe kuvvet iletiminde en temel görevi braketler üstlenmektedir. Braketler; boyut (mini, ultra mini gibi), taban yapısı (düz ya da eğimli), genişlik, şekil gibi yapısal özelliklerinin yanı sıra; ürettikleri malzeme ve üretim yöntemlerine göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. Braket sisteminin seçimi yapılırken, tedavi planlaması, hastanın beklentileri ve sistemin avantajları ile dezavantajları gibi önemli kriterler dikkate alınmaktadır. Klinik uygulamalarda en yaygın tercih edilen braket tipi ise konvansiyonel paslanmaz çelik braketlerdir (Öncağ ve ark., 2011).

Metallerin farklı fiziksel ve mekanik niteliklere sahip olmaları, sabit ortodontik tedavilerde kullanılan materyallerin genellikle birden fazla metalin kombinasyonu ile elde edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla en sık kullanılan alaşımlar arasında paslanmaz çelik, kobalt-krom (Co-Cr), Ni-Ti ve β -titanyum (β -Ti) gibi malzemeler bulunmaktadır (von Fraunhofer, 1997). Ortodontik tedavide en yaygın kullanılan materyallerin büyük bir kısmı ise paslanmaz çelik alaşımlarından oluşmaktadır (Tosun, 1999).

2.1.1 Metal Braketler

Modern ortodontide dört temel tip metal braket kullanılmaktadır: (Özkalaycı & Çiçek, 2018)

1. Paslanmaz çelik braketler
2. Co-Cr braketler
3. Ti braketler
4. Değerli metal braketler

Paslanmaz Çelik Braketler

Paslanmaz çelikten üretilen braketler, ortodontik tedavide ihtiyaç duyulan birçok özelliği aynı anda sağlayabilmektedir. Dayanıklılıklarının yüksek olması, hijyen açısından avantaj sunmaları ve maliyet açısından uygun olmaları, bu braketleri uzun yıllardır dünya genelinde en çok tercih edilen seçenek haline getirmiştir (Koçak, 2017).

Ancak paslanmaz çelik braketlerin bazı olumsuz yönleri de mevcuttur; bunlar arasında estetik açıdan yetersiz olmaları ve ağız ortamında metal iyonları

serbest bırakmalarıdır. Literatürdeki bazı in-vitro çalışmalar, paslanmaz çelikten üretilen materyallerin ağız ortamında Ni ve Cr iyonu serbestleştirdiğini ortaya koymuştur (Barrett ve ark., 1993; R. Maijer & D. C. Smith, 1986; Park & Shearer, 1983). Ortodontik aparey taşıyan bireylerde günlük salınan Ni miktarının yaklaşık 40 µg, Cr miktarının ise 36 µg olduğu belirlenmiştir (Edman & Möller, 1982). Özellikle Ni'nin çeşitli alerjik reaksiyonlara, dermatite ve astıma neden olabileceği bilinmektedir (Bishara ve ark., 1993; R. Maijer & D. C. Smith, 1986). Bu nedenle, nikel hassasiyeti bulunan bireylerde alternatif materyallerin tercih edilmesi önerilmektedir (Koçak, 2017).

Braket üretiminde kullanılan paslanmaz çelik türü, "American Iron and Steel Institute" (AISI) tarafından belirlenen standartlara göre, 303, 304 ve 316 gibi numaralarla sınıflandırılmakta olup, üretici firmaya göre farklılık gösterebilir. Daha düşük AISI numaraları, alaşım oranının görece az ve yapının daha yumuşak olduğunu gösterirken; yüksek numaralar sertlik artışı ve korozyon direncinin güçlendiğini ifade etmektedir (Khan, 2015). Ortodontide en sık tercih edilen paslanmaz çelik çeşidi AISI 304'tür (R. Maijer & D. C. Smith, 1986). 304 tipi paslanmaz çelik, içerik açısından %66-70 oranında demir (Fe), %18-20 Cr, %8-10,5 Ni, %2 manganez (Mn), %1 silikon (Si), %0,08 karbon (C), %0,04 fosfor (P), %0,03 kükürt (S) ve eser miktarda diğer elementlerden oluşmaktadır (Tosun, 1999).

Paslanmaz çeliğe üretim sürecinde farklı alaşım elementleri eklenmektedir (Khan, 2015):

Karbon (C): Sertlik ve dayanıklılığı artırır; fakat oran yükseldikçe, ağız sıvılarında lokalize korozyona yol açabilen krom karbür oluşumuna da zemin hazırlar.

Krom (Cr): Yüzeyde pasif krom oksit tabakası oluşturarak oksijen difüzyonunu sınırlar ve böylece korozyona karşı koruma sağlar.

Nikel (Ni): Ostenitik fazın stabilizasyonunu destekler, korozyon ve oksidasyona karşı direnci artırır. Ancak atomlar arası bağ zayıf olduğundan ağız ortamına Ni iyonu salınımı görülebilir. Bu nedenle yüksek korozyon direnci, nikelin biyouyumluluğu açısından kritik önemdedir.

Manganez (Mn): Ostenitik yapının stabilitesine katkıda bulunur ve Ni yerine kullanılabilir.

Azot (N): Ni gibi ostenitik fazın oluşumunu sağlar, stabilitesini artırır.

Molibden (Mo): Çeliğin korozyon direncini yükseltir.

Titanyum (Ti): Karbür oluşumunu stabilize ederek korozyon direncine katkıda bulunur.

Fosfor (P): Korozyon direncini ve dayanımı artırır, ayrıca sinterleme sıcaklığını düşürür.

Niobyum (Nb) ve Tantal (Ta): Karbonu stabilize eder ve korozyon direncini artırır.

Bakır (Cu): Çökelme sertleşmesi için eklenir.

Selenyum (Se) ve kükürt (S): İşlenebilirliği artırırken, mekanik dayanımı olumsuz etkileyebilir.

Ostenitik paslanmaz çelik, diğer paslanmaz çelik türlerine kıyasla korozyona karşı daha dirençlidir, üretim maliyeti nispeten düşüktür ve şekillendirilebilirliği oldukça iyidir. Bu nedenle ortodontide braket ve tellerin üretiminde en yaygın kullanılan çelik grubudur. En çok tercih edilen türler arasında 302, 303SE, 303L, 304, 304L, 316, 316L ve 318 bulunmaktadır (Eliades, 2007; Oh ve ark., 2005; Platt ve ark., 1997). Bu çelik türü manyetik değildir; hidroklorik ve halojenür asitler dışında pek çok çevresel faktöre dayanıklıdır. Ayrıca cilalanabilir yüzeyi sayesinde temizliği kolaydır (Platt ve ark., 1997).

Süper ostenitik paslanmaz çelikler, geleneksel ostenitik türlere kıyasla daha fazla molibden ve azot içerir. Bu nedenle hem klorür kaynaklı korozyona hem de çatlak korozyona karşı oldukça dirençlidirler. Ayrıca sürtünme özellikleri daha iyidir ve genellikle laboratuvar uygulamalarında tercih edilirler (Oh ve ark., 2005).

Martensitik paslanmaz çelik, oldukça sert ve dayanıklı olmasına rağmen düşük korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle ortodontik braket üretiminde uygun bulunmamaktadır (Berradja ve ark., 2006).

Co-Cr Braketler

1990'lı yıllarda paslanmaz çeliğe alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Genellikle döküm ya da metal enjeksiyonla kalıplama tekniği ile üretilmektedirler (Khan, 2015; Zinelis ve ark., 2005). Co-Cr braketler, paslanmaz çelik braketlerle karşılaştırıldığında çelik tel kullanımında daha düşük sürtünmeye neden olmaktadır (Moore ve ark., 2004; Nair ve ark., 2012). Ancak Ti braketlerle kıyaslandığında, hem paslanmaz çelik hem de β -Ti tellerle birlikte kullanıldığında daha fazla sürtünme oluşturmalar (Nair ve ark., 2012). Cr içeriği arttıkça, Co-Cr braketlerin korozyona direnç artmaktadır (Schiff ve ark., 2005).

Ti Braketler

Ni alerjisi bulunan hastalar için alternatif bir seçenek olarak geliştirilen Ti braketler, 1990'lı yılların ortalarında paslanmaz çelik braketlere karşı Ni içermeyen bir çözüm olarak tanıtılmıştır (Michelberger ve ark., 2000). Ti ve Ti alaşımlarından üretilen bu braketler, yüzeylerinde doğal olarak oluşan titanyum dioksit tabakası sayesinde yüksek korozyon direnci göstermektedir. Oluşan bu tabaka, paslanmaz çelik braketlerdeki krom oksit tabakasına kıyasla daha stabil olduğundan, Ti braketlerin korozyona karşı dayanıklılığı daha yüksektir (Brantley & Eliades, 2001).

Değerli Metal Braketler

Değerli metal braketler, genellikle altın (Au), platin (Pt) ve palladyum (Pd) kaplamalı çelikten üretilmektedir. Özellikle 16, 18 ve 24 ayar altın kaplamalı olanları, estetik avantajları nedeniyle lingual ortodontide tercih edilmektedir. Altının kimyasal olarak inert yapısı, uzun yıllardır dental protetik uygulamalarda güvenle kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ancak yüksek maliyeti nedeniyle altın braketlerin yerini zamanla daha ekonomik olan paslanmaz çelik braketler ve teller almıştır (Eliades & Athanasiou, 2002).

2.1.2 Plastik Braketler

Plastik braketler ilk kez 1963 yılında Morton Cohen ve Elliott Silverman tarafından geliştirilmiştir (Silverman ve ark., 1979). Estetik beklentileri karşılamak amacıyla şeffaf veya yarı saydam şekilde üretilen bu braketler, genellikle plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle elde edilmektedir. Metal braketlere kıyasla nikel içermemeleri sebebiyle, özellikle Ni alerjisi olan hastalar için uygun bir alternatif oluşturmaktadır (Özkalaycı & Çiçek, 2018)

2.1.3 Seramik Braketler

Seramik, bilinen en sert materyallerden biridir ve sertlik açısından paslanmaz çelik ve mineden daha üstündür (Swartz, 1988). Seramik braketler, plastik braketlere kıyasla daha güçlü bağlanma direncine, üstün estetik özelliklere, yüksek aşınma dayanımına ve renk stabilitesine sahiptir. Plastik braketlerde görülen eksikliklerin giderilmesi amacıyla geliştirilmiş olan seramik braketler, özellikle yetişkin hastalar arasında popülerlik kazanmıştır. İnert yapıları sayesinde, Ni ve Cr alerjisi bulunan bireylerde güvenle kullanılabilir (Khan, 2015).

2.2 Korozyon

Korozyon, metal iyonlarının doğrudan çözeltiye geçmesi veya genellikle oksit ya da sülfür bileşiği şeklinde yüzey tabakasının aşamalı olarak çözünmesiyle meydana gelen bir süreçtir. Altın ve platin gibi bazı metaller asal (noble) olup neredeyse inert özellik gösterirken, ortodontik tedavide yaygın olarak kullanılan metaller için bu durum geçerli değildir. Korozyon temelde eş zamanlı olarak gerçekleşen iki reaksiyondan, yani oksidasyon ve indirgenmeden (redoks) oluşur. Örneğin, zayıf bir asit ortamında demirin korozyon süreci incelendiğinde, oksidasyon (anodik) reaksiyonu sonucunda demir iyonları çözünerek ferro iyonlarına dönüşür ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$). Katodik bölgede ise hidrojen iyonları hidrojen gazına indirgenir ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$). Bu korozyon süreci, metal tamamen tüketilene kadar devam edebilir. Ancak, metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka (pasivasyon) oluşursa veya katodik reaktan tükenirse (örneğin, çözelti içindeki çözünmüş oksijen seviyesi azaldığında), korozyon süreci durabilir. Her metalin korozyona uğrama derecesi, bulunduğu ortamın kimyasal bileşimine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (House ve ark., 2008).

2.2.1 Korozyonun Tanımı ve Ortodontik Materyallerde Önemi

Ortodontik apareylerde kullanılan paslanmaz çelik, Co-Cr ve Ti alaşımları, korozyona karşı direnç sağlamak amacıyla yüzeylerinde pasif bir oksit tabakası oluşturacak şekilde üretilir. Ancak bu koruyucu tabaka tam anlamıyla güvenilir değildir; mekanik ve kimyasal etkilere karşı hassas olabilir. Ayrıca, oksit tabakaları zamanla çözünerek (pasivasyon) yeniden oluşabilir (re-pasivasyon). Bu süreç, metal yüzeyinin hava veya çevredeki oksijenle etkileşime girmesiyle meydana gelir. Asidik ortamlar ve klorür iyonları, pasivasyon sürecini hızlandırabilir. Bu nedenle, sodyum klorür açısından zengin bir diyetin ve asidik gazlı içeceklerin tüketiminin, ağız ortamında korozyon ajanlarının varlığını artırdığı belirtilmektedir (House ve ark., 2008).

Buna ek olarak, florür içeren ürünler (diş macunları, ağız gargaraları vb.), ağız ortamında asidik bir ortam oluşturarak korozyon sürecini hızlandırabilir. Yapılan çeşitli laboratuvar çalışmaları, florürlü ve asidik ortamların belirli metallerin, özellikle Ti'nin, korozyona daha duyarlı hale gelmesine neden olduğunu göstermektedir (Schiff ve ark., 2005; Toumelin-Chemla ve ark., 1996). Bu tür

koşullarda, yüksek koruyucu özelliğe sahip titanyum oksit tabakasının bozulmasıyla altta yatan alaşım doğrudan korozyona uğrar (House ve ark., 2008).

Sonuç olarak, ortodontik apareylerin korozyon davranışı, metal bileşimi, ağız ortamındaki pH seviyeleri, florür içeriği ve bireyin beslenme biçimi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Asidik içecekler, tuzlu gıdalar ve florür içeren ürünler, belirli metallerin korozyon sürecini hızlandırarak metal iyonlarının salınımına neden olabilir (House ve ark., 2008).

2.2.2 Korozyon Türleri

Yüzeysel korozyon, tüm metalleri etkileyen en yaygın korozyon türüdür, ancak her metal farklı oranlarda etkilenir. Metal, çevresiyle bir redoks reaksiyonuna girer ve genellikle korozyon büyük bir alanı etkileyene kadar fark edilmez (House ve ark., 2008).

Çukurlaşma ve yarık korozyonu, ortodontik tellerin ve braketlerin yüzeylerinde meydana gelebilir, çünkü bu materyaller tamamen pürüzsüz değildir. Mikroskopik düzeyde, bu yüzeylerde birçok çukur ve yarık bulunabilir. Bu pürüzlü yapılar, plak oluşturan mikroorganizmaların tutunmasına olanak tanıyarak korozyona karşı duyarlılığı artırabilir (Hunt ve ark., 1999; Schwaninger ve ark., 1982). Bu mikroorganizmalar, lokal pH'ı düşürerek ve oksijen tükenmesine yol açarak pasivasyon sürecini etkileyebilir (Eliades & Athanasiou, 2002). Hunt ve arkadaşları tarafından yapılan in vitro çalışmada, Ni-Ti tellerin yüzeylerinin pürüzsüz hale getirilerek cilalanmasının korozyon oranını azalttığı gösterilmiştir (Hunt ve ark., 1999).

Yarık korozyonu, çıkarılabilir apareylerde de meydana gelebilir, özellikle teller veya genişletme vidalarının akrilik içerisine gömüldüğü durumlarda ortaya çıkabilir. Bu, metal ile temas eden akrilik yüzeyinin altında kahverengi bir renklenmeye sebep olabilir. Bu renk değişiminin, tel ile akrilik arasındaki mikroorganizmalar ve yüzey biyofilmi nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir ve bu süreç metallerde yarık korozyonuna yol açabilir (Kusy ve ark., 2002; Sernetz, 1997).

Galvanik korozyon, iki farklı metalin bir arada bulunduğu ve bir iletken çözelti veya elektrolit ortamına yerleştirildiği durumlarda meydana gelir. Daha elektronegatif metal anot, daha elektropozitif veya asal (noble) metal ise katot görevi görür. Bu durumda daha elektropozitif metal öncelikli olarak korozyona

uğrar. Temel olarak, iki farklı metal arasındaki elektrokimyasal potansiyel farkı galvanik korozyon hücrelerinin oluşmasına neden olur. Ayrıca, farklı pH seviyeleri, yüzey pürüzlülüğü farklılıkları ve tekrarlayan bükülmelere bağlı iş sertleşmesi gibi faktörler de galvanik hücrelerin oluşumuna katkıda bulunabilir (House ve ark., 2008).

Ortodontik tedavide galvanik korozyon, farklı metallerin aynı braket veya ark teli içinde kullanılması durumunda ortaya çıkabilir. Çıkarılabilir apareylerde de iki farklı metalin varlığı galvanik korozyona neden olabilir; ancak bu durum lehimlenmiş eklem noktalarıyla daha da şiddetlenir. Çünkü lehimli bağlantılar mekanik olarak aktiftir ve korozyona karşı daha hassas hale gelir (Grimsdottir ve ark., 1992). Lehimli tellerde en büyük sorun, Fe, Zn, Cu ve özellikle Cd iyonlarının salınımıdır. Son üç element, Cd içeren gümüş lehimlerinden salınmaktadır (Berge ve ark., 1982).

Sürtünme korozyonu, metallerin sürekli yük altında kaldığı temas bölgelerinde oluşur. Ortodontide bu duruma en iyi örnek, braket ve ark teli arasındaki temas noktalarıdır. Yük uygulandığında, iki metal arasındaki basınç nedeniyle yüzeyler soğuk kaynak (cold welding) sürecine girer. Yüzeyler sürekli kuvvete maruz kaldığında, koruyucu oksit tabakaları zarar görerek metalin korozyona duyarlı hale gelmesine neden olur (House ve ark., 2008).

Ortodontik tellerin braketlere bağlanması, yük altında metal alaşımların reaktivitesini artırabilir; bu durum **gerilim korozyonu (stress corrosion)** olarak adlandırılır. Bu süreçte, tel boyunca elektrokimyasal bir potansiyel farkı oluşur ve bazı bölgeler anot, bazıları katot gibi davranarak korozyonu hızlandırır (House ve ark., 2008).

2.2.3 Ortodontik Açıdan Korozyonu Etkileyen Faktörler

Güncel ortodontik uygulamalarda tercih edilen materyallerin büyük çoğunluğu metal alaşımlardan oluşmaktadır. Bu materyaller, ağız ortamında sürekli olarak tükürükle temas ettiklerinden korozyona karşı dayanıklı olacak şekilde seçilmelidir. Sabit ortodontik sistemlerde kullanılan teller ve yaylar genellikle paslanmaz çelik, Ni-Ti, Co-Cr ve β -Ti alaşımlarından üretilmektedir. Braketler yalnızca metalden değil; seramik, polimer ya da bu yapıların metal ile birlikte kullanıldığı hibrit kombinasyonlardan da üretilebilmektedir. Seramik ve polimer esaslı braketler kimyasal ve mekanik hasarlara karşı daha duyarlıdır ancak inert

özellikleri nedeniyle korozyona uğramazlar ve metal braketlerde olduğu gibi korozyon riski taşımazlar(von Fraunhofer, 1997).

Paslanmaz çelik alaşımlar, ortodontik braketlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik braketlerin üretimi sırasında farklı üretim teknikleri uygulanmaktadır. Hangi üretim yönteminin daha düşük sitotoksiteye sahip olduğu konusunda literatürde kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır. Ancak, lehimlenmiş bileşenler içeren braketlerin daha fazla sitotoksik etki gösterebileceği düşünülmektedir (Wataha ve ark., 1994).

2.2.4 Braketlerin Yapımında Kullanılan Teknikler

Çekme ya da Frezleme Tekniğiyle Üretilen Braketler (Milled-machined brackets)

Bu üretim yönteminde, braketler uzun çubukların kesilmesiyle elde edilir. Kesim işleminin ardından taban parçası gövdeye lehimlenerek birleştirilir. Braket oluşu, çubuklardan elmas diskler kullanılarak kesilirken, oluşan küçük çapaklar, parlatma işlemi sırasında oluşun içine kıvrılabilir ve keskin kenar oluşumuna neden olabilir. Telin braketle temas ettiği bu keskin bölgeler, sürtünme kuvvetini artırarak mekanik etkileşimi olumsuz yönde etileyebilir (Tosun, 1999).

Braketler, üretim sürecinde ya tek parça halinde çekme tekniği ile ya da ayrı parçaların birleştirilmesi yoluyla elde edilebilmektedir. Ancak çekme yöntemi sırasında materyalin yaklaşık %50–75’inin kaybedilmesi, üretim maliyetini artırmakta ve bu nedenle frezleme işlemi, metal enjeksiyon kalıplama yöntemine kıyasla daha pahalı hale gelmektedir. Ayrıca çekme tekniği, üretim sürecinde üretici kaynaklı hatalara daha yatkın bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Khan, 2015).

Günümüzde modern ortodontik metal braketlerin üretiminde sıklıkla bilgisayar kontrollü (CNC) frezleme teknolojisi kullanılmaktadır. Bu yöntemde braket, tek parça halinde şekillendirilmekte ve gerekli kesme ile form verme işlemleri bilgisayar destekli makineler tarafından yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmektedir (Zinelis ve ark., 2005).

Döküm Braketler

Döküm tekniği, çoğunlukla braketlerin karmaşık yapı gösteren kısımlarının –örneğin taban örgüsü veya kanatlarının– üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemle braketler tek parça halinde de üretilebilmektedir. Döküm

yöntemiyle elde edilen braketler, çekme yöntemiyle üretilenlere kıyasla daha yumuşak yapıya sahiptir. Ancak aynı tür çelik kullanıldığında, metal enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen braketlere göre genellikle daha dayanıklı oldukları bildirilmiştir (Coley-Smith & Rock, 1999).

Bu teknikte, sıvı metal, özel olarak hazırlanmış braket kalıplarına enjekte edilir. Döküm yöntemiyle üretilen braketlerde de, oluk kenarlarının pürüzsüzlüğü konusunda bazı problemler yaşanabilmektedir (Tosun, 1999).

Sinterleme Tekniğiyle Üretilen Braketler

Sinterleme, atomik difüzyon ilkesine dayanan ve toz formundaki materyallerden katı yapılar elde etmeyi sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, toz haline getirilmiş materyal özel bir kalıp içerisine yerleştirilir ve erime sıcaklığının altında kalan belirli bir dereceye kadar ısıtılır. Isıtma sırasında atomlar partikül sınırları boyunca hareket ederek difüzyona uğrar ve böylece küçük parçacıklar birleşerek tek ve bütünleşmiş bir katı yapı oluşturur. Bu yöntem, hem metal hem de seramik braketlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Khan, 2015; Suharno ve ark., 2017).

İnce metal partikülleri, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında özel kalıplar içine sıkıştırılarak biçimlendirilir. Günümüzde modern braketlerin üretiminde yaygın olarak tercih edilen bu teknik, braketin oluk ve kanat gibi hassas bölgelerinin son derece düzgün ve hassas yüzey özellikleriyle oluşturulmasına imkân sağlar (Tosun, 1999).

Metal Enjeksiyonla Kalıplama (MIM) Tekniğiyle Üretilen Braketler

Metal Enjeksiyonla Kalıplama Tekniği (MIM) Metal enjeksiyonla kalıplama yöntemi, 1980'li yılların başlarında ABD'de geliştirilmiş bir toz metalurjisi tekniğidir. Bu yöntemde CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided Manufacturing) sistemleri kullanılmaktadır. Süreçte, 15 mikrona kadar küçültülmüş metal tozları; plastikleştiriciler, organik bağlayıcılar, kayganlaştırıcılar ve dağıtıcılarla karıştırılarak homojen bir hammadde elde edilir (Gabriele Floria & Cand, 1997). Bu karışım enjeksiyon kalıplama makinelerinde şekillendirilir ve “yeşil gövde” olarak bilinen kırılğan ürün ortaya çıkar. Yeşil ürün, son ürün boyutlarından %17–22 daha büyük olup, işleminden geçirilerek “kahverengi parça” adı verilen gözenekli yapıya dönüştürülür. Daha sonra bu parçalar, kontrollü ya da vakum ortamında yaklaşık 1400 °C'de sinterlenerek artık maddelerden arındırılır ve %17–22 oranında büzülerek son ürün haline gelir (Zinelis ve ark.,

2005). MIM tekniğinde paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom tozları kullanılmakta olup, günümüzde yüksek kaliteli braketlerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir (Brehm, 2000; Deguchi ve ark., 1996a)).

Metal enjeksiyonla kalıplama tekniğinin en önemli avantajlarından biri, braketlerin yüksek hassasiyetle ve tek parça halinde üretilebilmesidir. Lehimleme gerektirmemesi, sitotoksikite riskini düşürmekte ve biyouyumluluğu artırmaktadır. Ayrıca bu yöntemle elde edilen braketlerde kanatların daha dayanıklı olması, üretim maliyetlerinin düşük tutulabilmesi ve korozyon direncinin yüksek seviyede olması dikkat çekici üstünlükler arasındadır. Nikel salınımının düşük olması sayesinde alerjik reaksiyon ihtimali azalmakta, pürüzsüz yüzey yapısı da hem korozyon riskini hem de sürtünmeyi en aza indirmektedir (Eliades ve ark., 2008; Khan, 2015; Staffolani ve ark., 1999).

Bununla birlikte tekniğin bazı sınırlılıkları da vardır. Sinterleme süreci sırasında ortaya çıkan büzülme, ürünün boyutsal stabilitesini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca yüzeyde porozite oluşumu görülebilmekte ve bu durum mekanik dayanımı azaltabilmektedir. Bu nedenle üretilen braketlerde ek yüzey düzeltme işlemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Metal enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle elde edilen ürünlerde Vickers sertlik derecesinin nispeten düşük olması da bir başka dezavantaj olarak bildirilmektedir (Eliades ve ark., 2008; Siargos ve ark., 2007; Zinelis ve ark., 2005)

Ergitilmiş metal, yüksek basınç uygulanarak kalıp boşluklarına enjekte edilir ve istenen forma dönüştürülür. Günümüzde üretilen yüksek kaliteye sahip braketlerin büyük bir kısmı bu üretim yöntemiyle elde edilmektedir. (Tosun, 1999).

Seramik Enjeksiyonla Kalıplama Tekniği (CIM)

Seramik braketlerin üretiminde kullanılan CIM, teknik açıdan MIM ile benzerlik göstermektedir. Fark yalnızca hammadde seçiminde ve sinterleme sıcaklığındadır. Metal tozu yerine seramik tozu kullanılırken, sinterleme sıcaklığı yaklaşık 2000 °C'ye kadar çıkmaktadır (Khan, 2015; Reimann ve ark., 2016).

Plastik Enjeksiyonla Kalıplama Tekniği (PIM)

Plastik braketlerin üretiminde kullanılan en sık yöntem PIM tekniğidir (Khan, 2015). Plastik braketlerin en sık üretildiği yöntem PIM'dir (Khan, 2015). Bu teknikte polikarbonat materyali kullanılmakta olup, seramik braketlere göre daha düşük maliyetli ve estetik açıdan şeffaf seçenekler sunmaktadır. Ancak şeffaf plastik braketler, sıvı emilimine bağlı olarak zamanla renk değişikliğine

uğrayabilmektedir. Ayrıca slotların yeterli hassasiyette üretilmemesi, planlanan tork değerlerinin tam olarak aktarılmasını güçleştirmektedir. Bu sorunu azaltmak için plastik yapıya metal oluk eklenmiştir. Yüzeylerinin pürüzsüz görünmesine rağmen, bazı durumlarda yüksek sürtünme değerleri ortaya çıkabilmekte ve bu nedenle klinik kullanımları giderek azalmaktadır (Tosun, 1999).

2.2.5 Paslanmaz Çelik Braketlerde Korozyon ve Üretim Sürecinin Etkileri

Paslanmaz çelik materyallerde lehime ve kaynak işlemleri sırasında yanlış ısı uygulaması durumunda metal mikro yapısında taneler arası korozyon ve stres korozyonu gelişebilir. Bu durum, metal alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek dayanıklılığı olumsuz etkileyebilir (Deguchi ve ark., 1996b).

Kullanılan üretim yönteminden bağımsız şekilde, tüm metalik ortodontik materyaller korozyon süreçlerinden etkilenme potansiyeline sahiptir; ancak braket üretiminde kullanılan yöntemlerin çeşitliliği, parlatma işlemleri ve son şekillendirme teknikleri, braketlerin korozyona karşı duyarlılıklarını değiştirebilir (R. Maijer & D. Smith, 1986). Bazı üreticiler, elektroliz yöntemiyle parlatma işlemi uygulayarak braket yüzeyinin korozyona karşı hassasiyetini azaltmaktadır. Ayrıca, bazı braketler estetik amaçlı olarak altın elektrolizi veya titanyum nitrit kaplama ile işlenmektedir. Titanyum nitrit kaplama, sadece braketlerin estetik özelliklerini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda korozyona karşı dirençlerini de yükseltmektedir (von Fraunhofer, 1997).

Ortodontik ark telleri genellikle steril koşullarda değil, endüstriyel üretim ortamlarında hazırlanmakta ve “otoklavlanabilir” ibaresiyle ambalajlanmaktadır. Ancak otoklavlama işleminin, tellerin karakteristik özelliklerini ve kalitesini etkileyerek oksidasyon riskini arttırdığı rapor edilmiştir (Spalj ve ark., 2012). Genel olarak ortodontik materyaller, ağız ortamında biyolojik dokular ve tükürükle sürekli temas hâlinindedir; bu materyaller, çevredeki pH seviyesindeki dalgalanmalar ile sıcaklık farklılıklarının etkisine maruz kaldıklarında, korozyon hızlarında artış meydana gelebilmektedir (Gioka ve ark., 2004).

Ortodontik apareylerin korozyon süreci ilerledikçe, braketlerin etrafındaki diş minesinde meydana gelen renk değişiklikleri, korozyon ürünlerinin birikimiyle daha belirgin hale gelebilir ve çıplak gözle görülebilir (Eliades & Athanasiou,

2002). Korozyon sürekli devam eden bir süreç olduğu için zamanla braketlerin slotlarında pürüzlülük oluşabilir veya korozyon yan ürünleri birikebilir (Doğan & Ulusoy, 2013).

Elmas benzeri karbon kaplamalar (Diamond-Like Carbon; DLC), sağlamlık, düşük sürtünme katsayısı ve aşınmaya karşı yüksek direnç gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra, DLC kaplamalar biyouyumluluk sağlaması ve kimyasal açıdan inert olması nedeniyle biyomedikal uygulamalarda koruyucu bir bariyer görevi görmektedir (Doğan & Ulusoy, 2013).

2.2.6 Ortodontik tedavide korozyondan korunma yöntemleri

Ortodontik malzeme seçiminde mekanik özelliklerin yanı sıra, korozyon direnci de dikkate alınmalıdır. Ni-Ti alaşımlarından üretilen teller, galvanik korozyona duyarlı olabileceğinden, seçim sürecinde dikkatli olunması gerekmektedir. Malzeme tasarımı da korozyon üzerinde etkili bir faktördür. Özellikle, anodik alanların oluşmasına neden olan yüzey düzensizliklerinin bulunmaması önemlidir. Tellerin braket slotlarında hareketini kısıtlayan pürüzlü yüzeyler, mekanik performansı olumsuz etkileyebileceği gibi, korozyon direncini de azaltabilir. Bu nedenle, kullanılan malzemelerin mümkün olduğunca düzgün yüzeye sahip olması tercih edilmelidir. Ayrıca, yüksek gerilim noktalarından kaçınılmalı ve bükme işlemlerinin ardından gerilimi azaltacak ısıtma işlemleri uygulanmalıdır.

Ortodontik tellerin yüzey kaplamaları, korozyona karşı direnci artırmak amacıyla polimer, seramik veya titanyum oksit gibi maddelerle kaplanabilir. Bu kaplamalar sayesinde, ortodontik tedavi süresi boyunca korozyona karşı daha dayanıklı teller kullanılarak, korozyonun olumsuz etkileri minimize edilebilir. Korozyon hızı, ortamın sıcaklığı, tuz içeriği, iyon konsantrasyonu ve pH değeri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, hastaların bilgilendirilmesiyle uygun ağız ortamının sağlanması önemlidir. Örneğin, sıcak içeceklerin nasıl tüketilmesi gerektiği konusunda hastalara önerilerde bulunularak, sıcaklığın artışına bağlı korozyon riski azaltılabilir. Asidik besinlerin tüketimine karşı alınabilecek önlemler arasında ise, beslenme sonrası ağız hijyeninin sağlanması ve hastaların uygun diyet konusunda bilgilendirilmesi yer almaktadır (Küçükıyıldırım, 2007).

2.3 Ortodontik Materyallerde İyon Salınımı ve Biyolojik Etkileri

Ortodontik maloklüzyonun yaygınlığı ve tedavi gereksinimi arttıkça, sabit ortodontik apareyler (braketler) ile tedavi edilen hasta sayısında da artış gözlemlenmektedir. Bu apareyler, Ni, Co, Cr, Ti, Fe ve Cu gibi metal alaşımlarından üretilmektedir (Velasco-Ibanez ve ark., 2020). Çiğneme sırasında meydana gelen basınç değişiklikleri, sıcaklık dalgalanmaları ve besinlerle gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar, metal iyonlarının tükürüğe salınımına neden olmakta ve bu süreç uzun süre devam ettiğinde korozyon için uygun bir ortam oluşabilmektedir (Dwivedi ve ark., 2015).

Yapılan araştırmalar, sabit ortodontik apareylerin elektrokimyasal ayrışma mekanizması ile nikel ve krom iyonlarını tükürüğe saldıgını göstermektedir. Bu süreç, serbest radikallerin oluşumuna ve DNA bazında kimyasal değişikliklere yol açmaktadır (Hafez ve ark., 2011). Ni ve bileşikleri, arsenik ve sülfür kompleksleri oluşturarak alerjen, mutajen ve kanserojen özellik gösterebilmektedir (Hussain ve ark., 2016). Bu iyonlar, mukozaya nüfuz ederek epitel hücrelerini aktive edebilir ve bu hücrelerin çeşitli sitokinler veya kemokinler salgılamasına yol açabilir. Sonrasında bir bağışıklık yanıtı tetiklenir ve antijenler ile T hücreleri aktive olur. Bazı sitokinler, Langerhans hücreleri veya dendritik hücreler gibi antijen sunan hücreleri uyarır. Aktive olan antijenler lenf düğümlerine göç eder ve burada alerjenleri T hücrelerine sunar. Aynı alerjenle tekrar karşılaşılması durumunda, spesifik T hücreleri aktive olur ve kan dolaşımına girerek 48–72 saat içinde aşırı duyarlılık belirtilerinin ortaya çıkmasına neden olur. Ancak, nikel alerjisinde epitel ve bağışıklık hücreleri arasındaki etkileşimi yöneten kesin moleküler mekanizmalar henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Schuttelaar ve ark., 2018; Syed ve ark., 2015).

Epidemiyolojik çalışmalar, Ni ve Cr'nin neden olduğu aşırı duyarlılık reaksiyonlarını klinik olarak doğrulamıştır. Genel popülasyonun %15,7'sinin metallerle karşı alerjik olduğu, %14,5'inin özellikle Ni'ye karşı duyarlılık gösterdiği ve %0,8'inin Cr alerjisine sahip olduğu bildirilmiştir. Ni aşırı duyarlılığı, dünya çapında birçok ülkede farklı oranlarda görülmekle birlikte, genel olarak alerji geliştirme riski yüksek kalmaktadır (Schuttelaar ve ark., 2018). Ni alerjisi ile en sık ilişkilendirilen oral patolojiler arasında gingivit, deskuamatif oral lezyonlar, yanma hissi, ağızda metalik tat ve ağrı gibi şikayetler bulunmaktadır. Bu belirtilerin çoğu, sabit ortodontik apareylerden salınan Ni ve Cr iyonları ile doğrudan ilişkilidir (Chakravarthi ve ark., 2012; Pazzini ve ark., 2009).

Ti, sabit protezlerde, iskelet destekli protez yapılarında, metal altyapılı porselen restorasyonlarda ve dental implant sistemlerinde sıklıkla tercih edilen bir materyaldir (Muller & Valentine-Thon, 2006). Bununla birlikte, oldukça reaktif bir element olması nedeniyle saf hâlde elde edilmesi zordur. Titanyum ve alaşımlarının biyouyumluluk özellikleri, sahip oldukları üstün korozyon direnci ile ilişkilidir. Bu yüksek direnç, yüzeyde kendiliğinden oluşan yaklaşık 10 nm kalınlığındaki yoğun oksit tabakasından kaynaklanır. Bu tabaka, titanyumu asidik ortamlara, kimyasal ajanlara ve ısısal etkilere karşı koruyucu bir bariyer görevi görerek dayanıklılığını artırır (Leong ve ark., 1994). Biyolojik ortamlarda yapılan korozyon araştırmaları, titanyumun üstün korozyon direncine sahip olduğunu doğrulamıştır (Cai ve ark., 1999; Koike ve ark., 2003; Niinomi, 2008). Bununla birlikte literatürde (Cortada ve ark., 2000), implant materyali olarak kullanılan titanyumun korozyon ürünlerinin, çevredeki lenf düğümlerinde ve bazı iç organlarda birikme eğilimi gösterdiği; bu durumun ise galvanik kökenli reaksiyonların ortaya çıkmasına neden olabileceği belirtilmiştir. Bazı araştırmacılar (Tamai ve ark., 2001; Valentine-Thon & Schiwara, 2003) titanyuma karşı alerjik tepki gelişen vakalar gözlemlemiş ve bu durumu literatürde bildirmiştir.

Fe, yerkabuğunda en bol bulunan metaller arasında yer almakta olup, dünya yüzeyinde dördüncü sırada en yaygın element olarak kabul edilmektedir. Paslanmaz çelik üretiminde temel bileşenlerden biri olan demir, alaşımlara dayanıklılık ve sertlik kazandırırken toksik bir özellik göstermemektedir (Tezcan, 2014). Bu element, hem besin kaynaklarında hem de suda doğal biçimde bulunur. Yetişkin bir bireyin günlük demir gereksinimi yaklaşık 8–10 mg olup, vücutta ortalama 3–4 gram demir depolanır. Fe elementi; kalsiyum ve bakır (Cu) gibi minerallerin emilimini düzenlemede, kırmızı kan hücrelerinin oluşumunda ve çeşitli enzimlerin sentezinde önemli bir rol üstlenir. Ayrıca bağışıklık sisteminin etkinliğini destekleyerek organizmanın savunma mekanizmalarına katkıda bulunur (Bothwell ve ark., 1979).

Ancak yüksek dozlarda alındığında toksisiteye neden olabilir ve bazı proteinlere bağlanarak biyolojik yapılara zarar verebilir (Fraga & Oteiza, 2002).

Yeryüzünde Co yeryüzünde nadir bulunan elementlerden biridir ve çoğunlukla metal alaşımlarına, mekanik dayanım ve sertlik özelliklerini geliştirmek amacıyla eklenir. İnsan vücudunda ise, eritrosit üretimi için elzem olan B12 vitamininin moleküler yapısında yer almaktadır. Sağlıklı bireylerde kandaki normal

kobalt seviyesi yaklaşık 80–300 µg aralığındadır (Kawashima ve ark., 1998). İnsanlar üzerinde Co ve bileşiklerinin kesin olarak kanser oluşturduğuna dair net bulgular bulunmamakla birlikte, bu maddeler olası kanserojenler sınıfında değerlendirilmektedir. Buna karşın, hayvanlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, kobalt ve bazı bileşiklerinin tümör oluşumuna neden olabileceğini göstermiştir (Baldwin & Marshall, 1999). Co alerjisi, dental alaşımlar bağlamında nadiren karşılaşılan bir durumdur. Ancak, toksik etkiler genellikle oral alım miktarının 25–30 mg’yi aşması durumunda ortaya çıkmaktadır (Grimaudo, 2001).

Cu ve Zn ise, vücut için gerekli elementler olup, düşük toksisiteye sahiptir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen günlük Zn alım miktarı yetişkin bireyler için 22 mg olarak belirtilmiştir ve bu miktar, dental alaşımlardan salınan Zn iyonu miktarının oldukça altındadır (Çömlekoğlu ve ark., 2008).

2.3.1 Tükürüğün Kompozisyonu ve Fonksiyonları

Tükürük, ağız içindeki tükürük ve mukus bezleri tarafından salgılanan, berrak ve viskoz bir sıvıdır. Yapısında su, müsin, organik tuzlar ve sindirim enzimi pityalin bulunur. Tükürüğün temel işlevleri arasında ağız boşluğunu nemlendirme, besinlerin çiğnenmesine ve yutulmasına yardımcı olma ve nişastanın sindirimini başlatma yer almaktadır (Bhaskar, 1991). Tükürük, bileşiminde sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, bikarbonat ve fosfatlar gibi çeşitli elektrolitleri barındırmaktadır. Ayrıca immünoglobulinler, proteinler, enzimler, müsinler, üre ve amonyak gibi azotlu bileşenler de içermektedir. Bu bileşenler, çeşitli işlevleri yerine getirmek üzere birbirleriyle etkileşim halindedir:

(1) Bikarbonatlar, fosfatlar ve üre, pH dengesini düzenleyerek tükürüğün tampon kapasitesine katkıda bulunur.

(2) Makromoleküler proteinler ve müsinler, oral mikroorganizmaların temizlenmesi, kümelenmesi ve/veya diş yüzeyine tutunması süreçlerinde rol alarak dental plak oluşumuna katkı sağlar.

(3) Kalsiyum, fosfat ve proteinler, çözünmezliği artırarak diş minesinin demineralizasyon ve remineralizasyon süreçlerini düzenler.

(4) İmmünoglobulinler, proteinler ve enzimler, antibakteriyel etkiler göstererek ağız sağlığını destekler (Humphrey ve ark., 2001).

2.3.2 Tükürüğün pH Düzeyinin Ortodontik Materyaller Üzerindeki Etkisi

Tükürük, bir elektrolit gibi işlev görerek sabit ortodontik apareylerin metal bileşenlerinde korozyona neden olabilmektedir. Ortodontik alaşımlar, tükürük ortamında elektro-galvanik akımlar üreterek metal iyonlarının serbest kalmasına yol açar. Özellikle Ni iyonlarının salınımı, bağışıklık sistemini tetikleyerek kontakt dermatit, astım ve hücre toksisitesi gibi aşırı duyarlılık reaksiyonlarına sebep olabilir (Matos de Souza & Macedo de Menezes, 2008).

2.3.3 İyon Salınımı Ölçüm Yöntemleri

İyon Kromatografisi

Kromatografi, ilk kez 1903 yılında Polonya'daki Varşova Üniversitesi'nde çalışan Rus botanikçi Mikhail Semyonovich Tswett tarafından keşfedilmiştir (Tswett, 1906). Başlangıçta gaz kromatografisi (GC), ince tabaka kromatografisi (TLC) ve sıvı kromatografisi (LC), çoğunlukla organik maddelerin ayrımı ve tayini amacıyla kullanılmıştır. Sonrasında bu yöntemlerin inorganik analizlerde, özellikle de iyonik maddelerin ayrımı için uyarlanması önemli bir zorluk olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, 1975 yılında Small ve arkadaşları, anyon ve katyonların ayrımı ve kondüktometrik tespiti için yeni bir iyon değişim kromatografisi yöntemi tanımlamışlardır (Small ve ark., 1975). Aynı yılın Eylül ayında, Dionex Corporation, ticari olarak ilk iyon kromatografisini (Dionex DX 10) tanıtmıştır (Small ve ark., 1975).

Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi (AAS)

AAS, atomların enerji absorpsiyonu prensibine dayanan bir kimyasal analiz ekipmanıdır. Atomik spektrometri, absorpsiyon ve atomik emisyonla ilişkili spektrum ölçüm yöntemidir (Sugito, 2022). AAS, gaz halindeki serbest atomlar tarafından optik radyasyonun (ışığın) absorpsiyonunu kullanan bir spektroanalitik süreçtir ve kantitatif elementlerin belirlenmesinde kullanılır. Serbest metalik iyonlar tarafından ışığın absorpsiyonu, atomik absorpsiyon spektroskopisinin temelini oluşturur. Bu teknik, analitik kimyada bir numunedeki belirli bir elementin (analit) konsantrasyonunu belirlemek amacıyla kullanılır. AAS, farmakoloji, biyofizik, arkeoloji ve toksikoloji araştırmalarında, çözeltide veya elektrotermal buharlaştırma yoluyla doğrudan katı numunelerde 70'ten fazla farklı elementi belirlemek için kullanılmaktadır (Paudel ve ark., 2021).

AAS, serbest gaz halindeki atomların belirli bir dalga boyundaki elektromanyetik radyasyonu absorbe etmesini ve ölçülebilir bir sinyal üretmesini sağlayan bir teknolojidir. Absorpsiyon sinyali, optik kanaldaki serbest absorplayıcı atomların konsantrasyonu ile değişir. Bu nedenle, AAS testlerinde analitin önce gaz halindeki atomlara dönüştürülmesi gerekir; bu genellikle "atomizer" adı verilen bir hücreye ısı uygulanarak gerçekleştirilir. AAS tabanlı iki temel analitik prosedür, kullanılan atomizer türüne göre tanımlanır: sürekli sinyaller sağlayan alevli AAS (FAAS) ve her örnek için 2–4 dakika arasında değişen sürelerde kesikli sinyaller veren elektrotermal AAS (ETAAS). Her iki yöntemde de sıvı (veya çözünmüş) örnekler analizöre FAAS'ta aerosol olarak, ETAAS'ta ise iyi tanımlanmış mikrolitre düzeyindeki hacimlerde kolayca aktarılır. Ayrıca, hidrür üretimi ve soğuk buhar tekniklerinin kombinasyonu, analitlerin gaz fazında atomizere aktarılmasına olanak tanır (Fernández García ve ark., 2019). ETAAS yönteminde özellikle, önceden çözündürme işlemi yapılmadan katıların doğrudan elementel analizi de mümkündür (Resano ve ark., 2014).

Endüktif Eşleşmiş Plazma – Kütle Spektrometrisi (ICP-MS)

ICP-MS, katı ya da sıvı numunelerde çok sayıda elementin hızlı, ekonomik, yüksek hassasiyetli ve güvenilir biçimde tayin edilmesini sağlayan ileri düzey bir analiz yöntemidir. Bu teknik, kalitatif, kantitatif veya yarı kantitatif ölçümler yapılmasına olanak tanır.

Kütle spektrometrisi prensibinde, atom veya moleküllerden gaz fazında oluşan iyonlar birbirinden ayrılarak tespit edilir. ICP-MS tekniğinde numune, elektromanyetik indüksiyon aracılığıyla yaklaşık 10.000 Kelvin sıcaklığa ulaşan argon plazması içerisinde iyonlaştırılır. Elde edilen iyonlar daha sonra kütle spektrometresi tarafından kütlelerine göre ayrıştırılır ve elektron çoğaltıcı bir dedektör yardımıyla elementlerin konsantrasyonları ölçülür.

Bir maddenin kütle spektrumunun elde edilebilmesi için öncelikle gaz fazına geçirilmesi ve ardından iyonlaştırılması gerekir. Numune, vakum altında çalışan spektrometrenin giriş kısmına aktarılır; eğer madde gaz halinde değilse, belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak gaz fazına dönüştürülür. Bu gaz fazındaki moleküller, iyonlaşma bölgesine ince bir açıklıktan difüzyon yoluyla geçiş yapar.

İyonlaşma bölgesinde oluşan iyonlar, elektriksel potansiyel farkı aracılığıyla hızlandırılır ve kütle ayırıcı sisteme yönlendirilir. Kütle ayırıcısından geçen iyonlar, cihazın dedektörü tarafından algılanır. Dedektör kısmında, negatif

potansiyelde tutulan iletken bir kap, pozitif iyonları çekerek elektrik akımı oluşturur. Bu sinyal, iyonların miktarına bağlı olarak ölçülür.

Kütle spektrometrisinde elde edilen kütle spektrumu, belirli koşullarda parçalanmış iyonlara ait paternleri gösterir. Bu spektrumlar, bilinen referans örneklerle karşılaştırılarak molekülün kalitatif analizi yapılabilir. Spektrumda gözlenen en yüksek sinyal “temel pik” olarak adlandırılır ve genellikle en kararlı iyonu temsil eder. Diğer sinyallerin göreceli yoğunlukları, bu temel pik ile karşılaştırılarak değerlendirilir.

Yöntem yalnızca kalitatif değil, aynı zamanda kantitatif analiz için de oldukça uygundur. Çünkü spektrumdaki sinyal yüksekliği, numunedeki elementin derişimiyle doğru orantılıdır. ICP-MS yöntemiyle yapılan kantitatif analizler çok az numune miktarıyla yüksek duyarlılıkla gerçekleştirilebilir. Ayrıca örnekteki tüm elementlerin konsantrasyonları, yaklaşık 1–2 dakika gibi kısa bir sürede ölçülebilmektedir (Kutsal, 2022).

İndüktif Eşleşmiş Plazma - Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES)

ICP-OES farklı örnek matrislerinde yer alan çok sayıdaki metal elementin belirlenmesinde kullanılan, yüksek verimli ve hassas bir analiz tekniğidir. Bu yöntemde sıvı numuneler, çeşitli nebulizer veya örnek besleme sistemleri aracılığıyla radyofrekans dalgalarıyla uyarılmış argon plazmasına aktarılır (Boss & Fredeen, 1999). Numune, plazma içinde hızla kurutulur, buharlaştırılır ve yüksek sıcaklıkta enerji kazanarak uyarılır. Plazmadan yayılan atomik emisyonlar optik sistem tarafından toplanır; mercekle veya ayna yardımıyla dalga boyu seçici bölüme yönlendirilir. Tek element tayinleri, genellikle monokromatör ve fotoçoğaltıcı tüp kombinasyonlarıyla düşük maliyetli biçimde yapılabilirken, polikromatörlü sistemler sayesinde 70’e kadar elementin aynı anda ölçümü mümkün hale gelmiştir (Hou & Jones, 2000). Bu sistemler, özellikle analitik hassasiyet ve verimlilik açısından diğer anorganik analiz yöntemleriyle yarışabilecek düzeyde performans sergiler.

ICP-OES cihazı, diğer uyarma kaynaklarına sahip spektrometrelerle karşılaştırıldığında, geniş element yelpazesinde etkili buharlaştırma, atomlaştırma, uyarma ve iyonlaştırma yeteneğiyle öne çıkar. Bu özellik, cihazın plazma bölgesinde ulaşılan yaklaşık 6000–7000 K sıcaklık sayesinde elde edilir; bu değer, grafit fırınlı sistemlerin erişebildiği 3300 K civarındaki sıcaklıklardan çok daha yüksektir.

ICP'nin sağladığı bu yüksek sıcaklık, ısıya dayanıklı elementlerin de etkin biçimde uyarılmasına olanak tanır. Böylece karmaşık matris yapısına sahip örneklerde dahi yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilir. Doğru akım (DC) ya da alternatif akım (AC) temelli plazma kaynakları da yüksek sıcaklık gerektirse de, ICP sistemi bu tekniklere göre daha düşük gürültü üretir ve sıvı numuneler için çok daha uygundur. Ayrıca, ICP plazması elektrotsuz çalıştığı için, elektrot materyallerinden gelebilecek potansiyel kirlenmeler tamamen ortadan kaldırılmış olur (Caner, 2015).

ICP-OES cihazı yaklaşık 7000–8000 K plazma sıcaklığına ve 10^{14} – 10^{16} cm³ aralığında elektron yoğunluğuna sahiptir. Bu koşullar altında fosfor (P) ve kükürt (S) dâhil yaklaşık 70 element eş zamanlı olarak iyonlaştırılmaktadır. Yöntemde arka plan emisyonu düşüktür ve kimyasal girişimler sınırlı düzeydedir. Cihazın yüksek kararlılığı ölçümlerde kesinlik ve hassasiyetin korunmasına neden olmaktadır.

ICP-OES tekniğinde birçok element için 0,1–100 ng/mL aralığında algılama sınırları bulunmaktadır. Yöntem, geniş bir lineer dinamik aralık (LDR) değerine sahiptir. Bu teknik özellikler, ICP-OES sisteminin düşük maliyetli analizlerde kullanılmasına imkân vermektedir (Caner, 2015).

2.4 Beyazlatma (Bleaching)

Diş estetiği, özellikle diş rengi, hastalar için büyük önem taşır. Örneğin, Birleşik Krallık'ta erişkin bireylerin yaklaşık %28'i dişlerinin görünümünden memnun olmadıklarını ifade etmiştir (Qualtrough & Burke, 1994). Benzer şekilde ABD'de yetişkinlerin %34'ü mevcut diş renklerinden rahatsızlık duyduklarını belirtmiştir (Odioso ve ark., 2000). Ayrıca Birleşik Krallık'ta 3215 kişi ile yapılan geniş kapsamlı bir ankette, katılımcıların %50'sinin ağızlarında bir çeşit renklenme problemi bulunduğunu bildirdiği rapor edilmiştir (Alkhatib ve ark., 2004).

Dişlerin rengi hem içsel (intrinsik) faktörlere hem de yüzeyde meydana gelen dışsal (ekstrinsik) etkilere bağlı olarak belirlenmektedir (Joiner, 2004; Watts & Addy, 2001). İçsel renklenme; mine ve dentin gibi sert diş dokularının ışığı yansıtma ve absorbe etme özelliklerinden kaynaklanır. Bu bağlamda dentin, dişin genel tonunu belirlemede asıl etken dokudur (Muia, 1982; Ten Bosch & Coops, 1995). Ekstrinsik lekeler genellikle diş fırçalama ve diş macununun aşındırıcı etkisinin daha az ulaşabildiği bölgelerde oluşmuş diş fırçalama sırasında ulaşılması zor

olan bölgelerde birikir (Macpherson ve ark., 2000). Bu lekelenmelerin oluşmasında sigara kullanımı, tanen içeriği yüksek gıdalar (örneğin kırmızı şarap) ve klorheksidin gibi katyonik ajanlar ile bazı metal tuzları (örneğin kalay, demir) etkili olmaktadır (Hannig & Joiner, 2005; Joiner ve ark., 1995; Nathoo, 1997; Watts & Addy, 2001).

Diş rengini iyileştirmeye yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlar arasında beyazlatıcı etkili diş macunları, profesyonel diş taşı temizliği (skaling ve polisaj), vital olmayan dişlerde internal beyazlatma, vital dişlerde eksternal beyazlatma, asit ve abraziv ajanlarla yapılan mine mikroabrazyonu, laminate veneer ve kron uygulamaları gibi çeşitli tedavi seçenekleri yer almaktadır (Berman, 1982; Joiner ve ark., 2002; Sarrett, 2002).

Son yıllarda yaşam kalitesinin artmasıyla birlikte estetik kaygılar da ön plana çıkmış ve diş hekimliğinde estetik odaklı tedavi seçeneklerine olan talep ciddi şekilde artmıştır. Estetik diş hekimliğinde sıklıkla tercih edilen uygulamalar arasında kompozit ve seramik lamineler, tam seramik restorasyonlar, metal destekli porselen kronlar ve diş beyazlatma işlemleri yer almaktadır. Özellikle ön bölgede renklenme problemi olan dişlerin beyazlatılması, estetik diş tedavileri içinde en sık talep edilenlerden biridir (Shahabi ve ark., 2017). Diş beyazlatma, ortodontik veya restoratif tedavilerle birlikte uygulandığında estetik görünümün yanı sıra, dişin şekil ve fonksiyonunun yeniden kazanılmasına da katkı sağlamaktadır (Sundfeld ve ark., 2012).

Ortodontik tedavi gören bireylerde dişlerdeki renk değişimi, geçici de olsa önemli bir estetik sorun olarak ortaya çıkabilir. Bu durum genellikle sabit aparey kullanımı sırasında ağız hijyeninin yeterince sağlanamamasına bağlanmaktadır. Yapılan araştırmalar, ortodontik tedavi sürecinde oluşan renklenmelerin giderilmesi amacıyla beyazlatma uygulamalarına yönelimin arttığını göstermektedir (Dostalova ve ark., 2004).

Hem ev tipi hem de klinik ortamda uygulanan beyazlatma tedavilerinde aktif içerik olarak genellikle HP ve KP bileşikleri kullanılmaktadır. Bu ajanlar, diş dokusuna penetre olduklarında oksijen salınımı ile pigmentleri parçalayıp renk açılmasına neden olur (Féliz-Matos ve ark., 2015; Li ve ark., 2024). Literatürde bu maddelerin sistemik olarak güvenli olduğu, yalnızca sınırlı düzeyde lokal yan etkilere yol açabileceği belirtilmektedir (Alkahtani ve ark., 2020; Kim ve ark., 2022; Li & Greenwall, 2013).

2.5 Diş Beyazlatmanın Mekanizması

Diş beyazlatma işlemi, farklı konsantrasyonlarda HP ve onun türevlerinin kullanıldığı kimyasal bir süreçtir. Beyazlatmanın temelinde, peroksit moleküllerinin serbest radikallere dönüşerek renkli bileşikler parçalama etkisi yatmaktadır. Bu işlem sırasında uzun zincirli organik pigmentler, serbest oksijen radikalleri tarafından daha küçük ve açık renkli moleküllere ayrıştırılır. Renkli bileşiklerin büyük kısmı, tek veya çift bağlı uzun zincirlerden oluşur ve genellikle karbonil grupları, fenil halkaları ya da heteroatomlar içeren yapılardır. Bu yapılar kromofor olarak adlandırılır. Oksidatif parçalanma sürecinde bu kromoforların kimyasal yapıları bozulur, çift bağlar kırılır veya oksitlenerek renksiz ürünlere dönüşür (Westland, 2003).

Her ne kadar HP ve KP gibi oksidatif ajanların dişleri tam olarak nasıl beyazlattığı net biçimde açıklanamamış olsa da (Hannig ve ark., 2003; Sulieman, 2004), mevcut bilgiler bu ajanların diş yapısına difüze olarak derin dokulara ulaştığını göstermektedir. Literatürdeki birçok çalışmada, peroksit ajanlarının mineyi geçerek dentin-mine birleşiminden pulpaya kadar ilerlediği ve uygulamadan kısa bir süre sonra bile pulpa odasında düşük seviyelerde peroksit varlığı saptandığı bildirilmektedir (Bowles & Ugwuneri, 1987; Cooper ve ark., 1992; Gökay ve ark., 2005; Joiner & Thakker, 2004; Slezak ve ark., 2002; Thitinthapan ve ark., 1999). Bu tespit edilen konsantrasyonlar, pulpa içindeki enzimatik faaliyetleri bozacak düzeylerin oldukça altında kalmaktadır (Joiner & Thakker, 2004). Peroksit ajanı, dişin sert dokularına difüze olduktan sonra, içeride yer alan pigmentli moleküllerle kimyasal reaksiyona girer. Renk değişikliği özellikle dentin dokusunda daha belirgin şekilde görülmektedir. Örneğin McCaslin ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, cam yüzeye monte edilmiş insan dişlerinde karbamid peroksit ile uygulanan beyazlatma sonrasında dentin boyunca anlamlı renk açılması meydana geldiği gözlemlenmiştir (Mccaslin ve ark., 1999). Benzer şekilde, %10 KP, %5.3 ve %6 HP ile tedavi edilen dentin örneklerinde sarı tonunun azaldığı, beyazlık indeksinin ise anlamlı şekilde yükseldiği belirtilmiştir (Joiner ve ark., 2004; White ve ark., 2000). Sulieman ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada ise, siyah çay ile yapay olarak renklenmiş dişlerde %35 HP içeren jel ile tedavi sonrası özellikle bukkal yüzeylerde güçlü beyazlatma etkisi elde edilmiştir (Sulieman ve ark., 2005).

2.5.1 Beyazlatma Yöntemleri

Ofis Tipi Beyazlatma

Profesyonel diş beyazlatma işlemleri, genellikle yüksek konsantrasyonlu (%25–40 HP veya %37'ye kadar KP içeren) jellerin uygulanmasını içermektedir. Bu jeller bazı durumlarda LED veya lazer ışığı yardımıyla aktive edilirken, bazı formülasyonlar kendiliğinden aktive olma özelliğine sahiptir. Klinik uygulamalarda beyazlatma işlemine başlamadan önce, ağız hijyeninin sağlanması amacıyla diş taşı temizliği ve polisaj gibi ön işlemler yapılması önerilmektedir (Carey, 2014; de Oliveira ve ark., 2024; Féliz-Matos ve ark., 2015; Malcangi ve ark., 2023; Maran ve ark., 2020; Sutil ve ark., 2022). Uygulama sırasında diş etlerinin zarar görmemesi için ağız açıcılar, lastik örtüler veya bariyer jeller kullanılmakta, ancak bu koruyucu yöntemler üretici firmaya ve klinik protokole göre değişiklik gösterebilmektedir. Tedavi sonrası hastalara, belirli bir süre boyunca renklenmeye neden olabilecek yiyecek ve içeceklerden kaçınmaları ve ağız hijyenine özen göstermeleri önerilmektedir (de Oliveira ve ark., 2024; Hardan ve ark., 2024; Malcangi ve ark., 2023; Maran ve ark., 2020).

Ev tipi Beyazlatma

Evde uygulanabilen beyazlatma yöntemleri, kişiye özel olarak hazırlanan şeffaf termoplastik plaklar içerisine yerleştirilen beyazlatıcı jellerle gerçekleştirilir. Hekim kontrolünde uygulanan bu yöntemde genellikle aktif ajan olarak %10–22 oranında KP içeren beyazlatıcı jeller kullanılır. Bu teknik, “home bleaching” olarak adlandırılmakta ve gece boyunca, ortalama 6–8 saatlik periyotlarda, genellikle 2–6 hafta süresince uygulanmaktadır. Üretici firmaların belirttiği kullanım süresinin aşılması, peroksitlerin diş yapısına zarar verebilecek doygunluk düzeylerine ulaşmasının önüne geçmek açısından önem taşımaktadır (Eachempati ve ark., 2018).

Ortodontik tedavi gören bireylerde, sabit apareylerin neden olduğu estetik kayıpların giderilmesi amacıyla beyazlatma uygulamaları gün geçtikçe daha yaygın hâle gelmektedir. Sabit braketlerin varlığına rağmen, beyazlatma tedavilerinin etkili olabileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Opalescence Treswhite Ortho gibi ortodontik tedaviye özel olarak geliştirilen ürünler bu ihtiyaca yönelik güvenli bir çözüm sunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, %8 HP içeren bu ürünle hem sabit aparey taşıyan hem de braketsiz bireylerde benzer düzeyde renk açılması elde edildiği ve istatistiksel olarak anlamlı beyazlatma sağlandığı bildirilmiştir. Bu

sonuçlar, sabit ortodontik tedavi sırasında estetik beklentilerin karşılanabileceğini göstermektedir (Enrique Jadad ve ark., 2011).

Diş beyazlatma amacıyla piyasada hekim kontrolü olmadan satılan birçok ürün (over the counter-OTC) de mevcuttur. Bu ürünler arasında beyazlatıcı etkili diş macunları, ağız gargaraları, spreyler, “paint-on” jeller, LED ışıklı kitler ve peroksitli stripler yer almaktadır (Demarco ve ark., 2009). Bu ürünler diş hekiminin herhangi bir kontrolü olmadan, diğer kozmetik materyaller gibi doğrudan tüketicinin kullanımına sunulan malzemelerdir. OTC ürünler kozmetik ürün statüsünde değerlendirildiğinden dolayı, doğrudan tüketiciye sunulmakta ve herhangi bir klinik denetime tabi olmadan kullanılabilir. Diş macunları, genellikle yüzeydeki lekeleri uzaklaştırmaya yönelik aşındırıcı partiküller içerir ve bu nedenle yalnızca yüzeysel renklenmelere karşı etkilidir (Joiner ve ark., 2008). Ağız gargaraları ise genellikle düşük konsantrasyonda (%2) HP içerir; bazı formülasyonlara, yeniden renklenmenin önüne geçilmesi için sodyum heksametafosfat da eklenmiştir. Paint-on sistemlerde, HP ya da KP içeren jeller doğrudan diş yüzeyine fırça ile uygulanır (Kishta-Derani ve ark., 2007). Bunun dışında düşük konsantrasyonlu HP içeren stripler de ön dişlere yapıştırılarak uygulanabilir. Ancak bu tip ürünlerin etkileri sınırlı kalmakta; profesyonel beyazlatma uygulamalarına kıyasla daha az tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca bu ürünlerin kontrolsüz kullanımı, diş ve yumuşak doku sağlığı açısından potansiyel riskler taşımaktadır (Naidu ve ark., 2020).

2.5.2 Klinik Uygulamada Kullanılan Beyazlatıcı Ajanlar ***Hidrojen Peroksit (HP)***

HP, diş beyazlatma tedavilerinde en yaygın kullanılan aktif maddedir. Düşük konsantrasyonlarda insan vücudunda doğal olarak bulunabilen bu molekül, yüksek oranlarda kullanıldığında bakteriyostatik etkiler gösterebilir; çok yüksek konsantrasyonlarda ise DNA hasarına neden olabilecek düzeyde mutajenik etki oluşturabilmektedir (Dahl & Pallesen, 2003). Renksiz, acı tatlı bir sıvı olan HP, suda kolayca çözünerek asidik karakterli bir solüsyon oluşturur. HP içeren beyazlatma ürünlerinde, bu bileşiğin parçalanması sonucunda açığa çıkan oksijen radikalleri diş dokusuna nüfuz eder ve pigment bileşiklerini okside ederek renk değişimine neden olur (Greenwall, 2005). Düşük moleküler ağırlığa sahip olması nedeniyle HP, sert ve yumuşak dokulara hızlı şekilde difüze olabilir. Bu bileşiğin

protein denatürasyon etkisi oldukça yüksektir ve bu etki, sıcaklık arttıkça daha da belirgin hale gelir. Özellikle işlem sırasında sıcaklık değerlerinin kontrolsüz şekilde yükselmesi durumunda, pulpa dokusunda dejeneratif değişikliklerin meydana gelme riski söz konusu olabilir (Dahl & Pallesen, 2003).

Karbamid Peroksit (KP)

Karbamid Peroksit (KP) KP, beyazlatma işlemi sırasında HP ve üre olmak üzere iki bileşene ayrılan kararsız bir maddedir. Yaklaşık %10 KP içeren bir ürün, %3.6 HP ve %6.5 oranında üre üretir (Alaçam, 2000). Üre ise daha sonra amonyak ve karbondioksit parçalanır. Ortaya çıkan amonyak, ortamdaki pH'ı yükselterek serbest radikal oluşumu için gerekli aktivasyon enerjisinin artırılmasına yardımcı olur. Piyasada bulunan KP bazlı beyazlatıcı ürünler, içeriklerine göre ikiye ayrılabilir: Karbopol içeren ve içermeyen formülasyonlar. Karbopol bulunan ürünlerde oksijen salınımı daha yavaş gerçekleşirken, karbopol içermeyen ürünlerde bu süreç daha hızlıdır (Haywood & Heymann, 1991). Karbopol, jelin taşıyıcısı olarak görev yapar ve doğrudan beyazlatıcı etki göstermez. Viskoziteyi artırarak jel yapının dış üzerinde daha uzun süre kalmasını sağlar, dış etlerinin tahriş olmasını önler ve oksijen salınım süresini uzatarak etkinin sürekliliğini destekler (Matis ve ark., 2000). Öte yandan, üre hem HP'nin stabilitesini artırır hem de ortamın pH'ını yükseltici etkisiyle beyazlatma mekanizmasına katkı sunar. Ayrıca ürenin antikaryojenik özellikleri, tükürük akışını uyarıcı etkisi ve yara iyileşmesini destekleyici rolleri de mevcuttur (Greenwall, 2005).

Sodyum Perborat

Beyaz renkli toz formunda bulunan bu madde, suyla ya da asidik ortamlarla temas ettiğinde oksijen açığa çıkarır ve genellikle HP ile karıştırılarak “pat” formunda kullanılır. Bu kombinasyon, sinerjik bir etki oluşturarak beyazlatma etkinliğini artırır. Taze haldeyken %95 oranında sodyum perborat içerir ve bunun yaklaşık %9.9'u oksijen olarak salınabilir durumdadır. Kuru formda stabil olan perborat, ılık hava, su ya da asit ortamında dekompoze olarak HP veya oksijen üretir. Genellikle alkali karakterde olan perborat bileşikler, yüksek konsantrasyonlu HP'ye göre daha güvenli ve kullanımı kolay ajanlardır (Alaçam, 2000).

Sodyum Perkarbonat

Sodyum perkarbonat, HP ile sodyum karbonatın birleşimiyle elde edilen kokusuz ve kristalimsi bir tozudur. Diş beyazlatma işlemlerinde, aktif oksijen radikallerinin oluşmasını sağlayarak leke giderici etki gösterir (Alaçam, 2000).

Hidroklorik Asit (HCl)

%18–36 arasında değişen konsantrasyonlarda kullanılabilen HCl, güçlü beyazlatıcı etkisinin yanı sıra mine yüzeyinde dekalsifikasyon riski taşıdığından, yalnızca belirli klinik durumlarda sınırlı şekilde uygulanmaktadır. Genellikle mine yüzeyindeki yüzeysel renklenmelerin giderilmesinde tercih edilmektedir (Arens, 1989).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Rektörlüğü, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2025-DUP-003 proje numarasıyla desteklenmiştir.

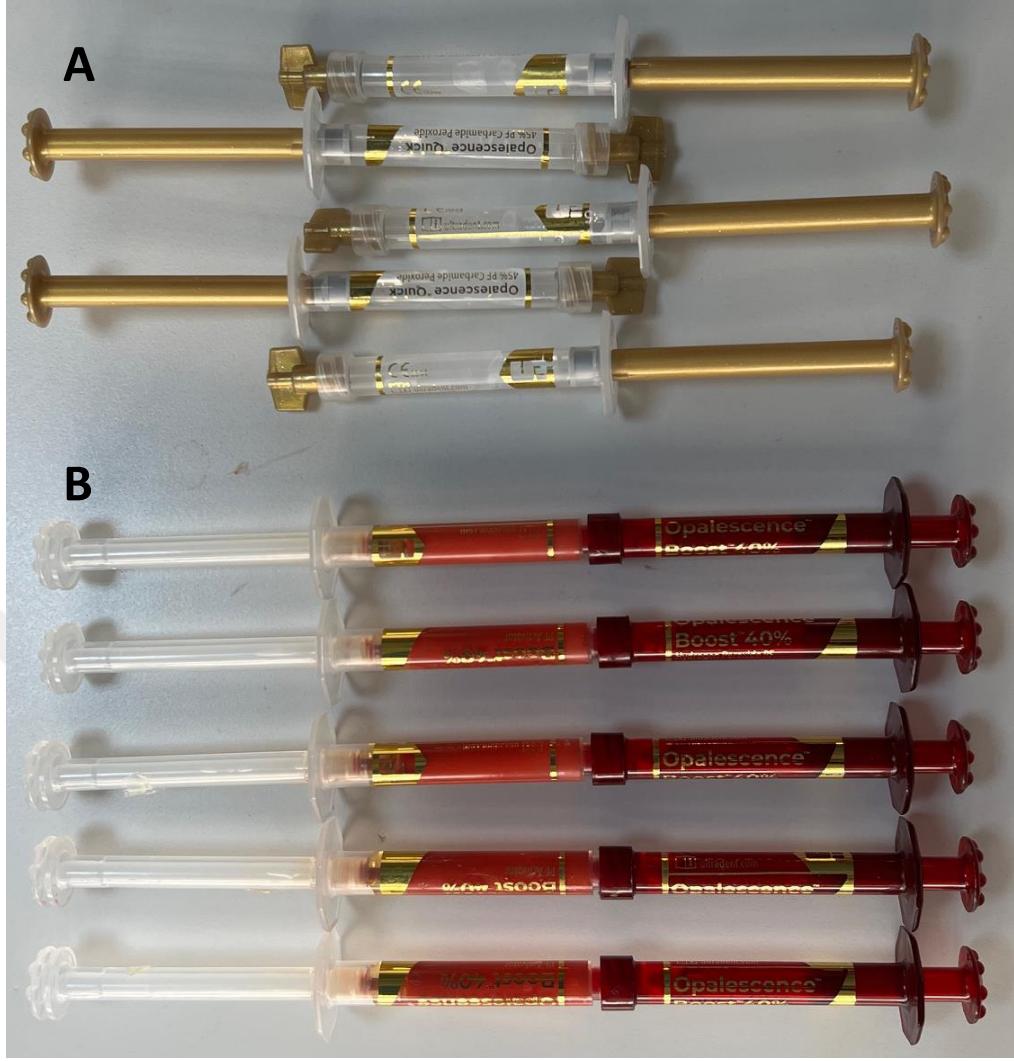
3.1 Araştırmada Kullanılan Braketler

Bu çalışmada, üç farklı ortodontik malzeme üreticisine ait paslanmaz çelik braketler kullanılmıştır. Her bir firmadan 0.022" slot genişliğine sahip MBT reçeteli, sağ üst santral kesici dişe ait kapaksız paslanmaz çelik braketlerden 30'ar adet alınarak toplamda 90 braket temin edildi.

Braketler American Orthodontics™ Mini Master (AO) (Sheboygan, WI, ABD), Dentaaurum™ Discovery Smart (D) (Ispringen, Baden-Württemberg, Almanya) ve 3M Unitek™ Solventum (3M) (Monrovia, CA, ABD) firmalarına aittir. Braketler beyazlatma ajanlarına maruz bırakıldıktan sonra gerçekleşen metal iyon salınımı açısından karşılaştırılmıştır.

3.2 Beyazlatma ajanları

Deneysel gruplarda, yaygın olarak kullanılan iki farklı ofis tipi beyazlatma ajanı kullanılmıştır. Bunlardan ilki %40 hidrojen peroksit (Opalescence Boost™, Ultradent) (HP), diğeri ise %45 karbamid peroksit (Opalescence Quick PF™, Ultradent) (KP) içermektedir. Bu beyazlatıcılar ortodontik tedavi gören bireylerde uygulanan beyazlatma işlemlerinin materyal biyouyumluluğu üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla tercih edilmiştir.



Fotoğraf 3.1 Bu çalışmada kullanılan iki farklı beyazlatma ajanı: A) %45 KP içeren Opalescence Quick PF ve B) %40 HP içeren Opalescence Boost.

3.3 Yapay Tükürük Çözeltisi

Çalışmada kontrol grubu için yalnızca yapay tükürük (YT) çözeltisi kullanılmıştır. Bu grup, beyazlatma ajanlarına maruz bırakılmaksızın değerlendirilmiştir. YT çözeltisi, ağız ortamını simüle edecek şekilde hazırlanmış ve bekletme süresince sıcaklık ve pH açısından sabit tutulmuştur. Deney gruplarındaki braketler de beyazlatma işlemi sonrasında bu yapay tükürüğe aktarılmış ve iyon salınımı açısından karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

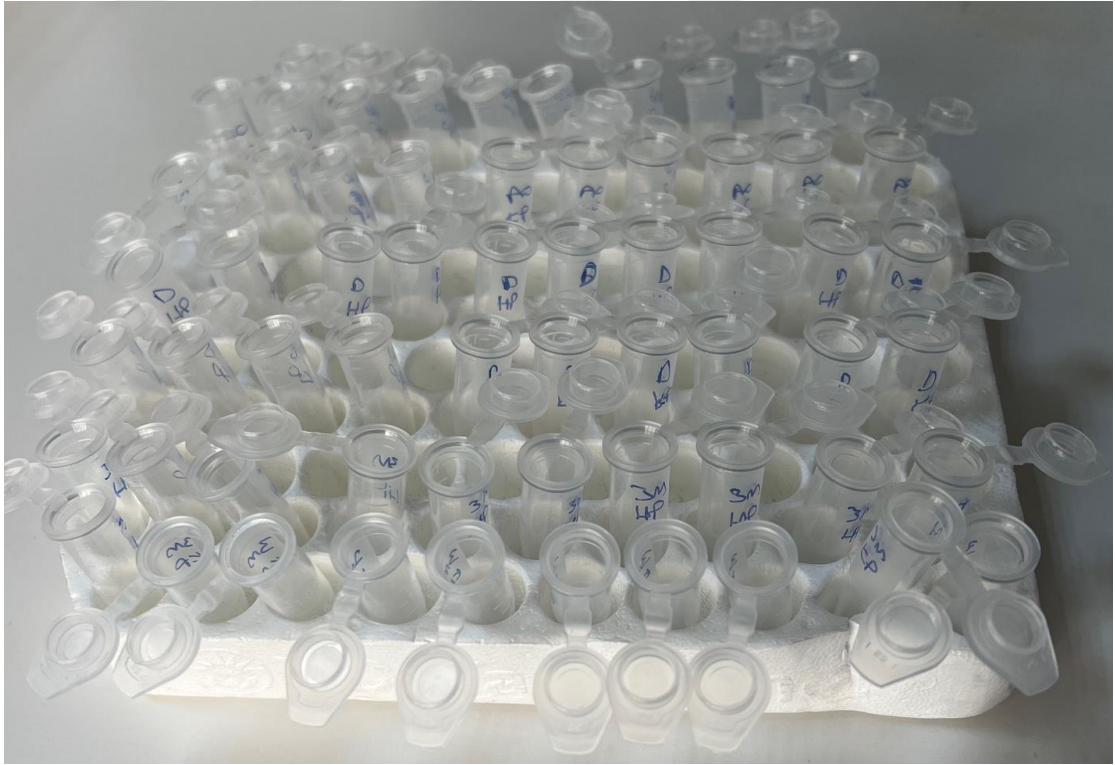
3.3.1 Yapay Tükürüğün İçeriği ve Hazırlanması

Çalışmada kullanılan yapay tükürük solüsyonu, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarlarında Almqvist ve Lagerlöf'ün tariflerine uygun olarak hazırlanmıştır. Solüsyonun içeriğinde 1.0

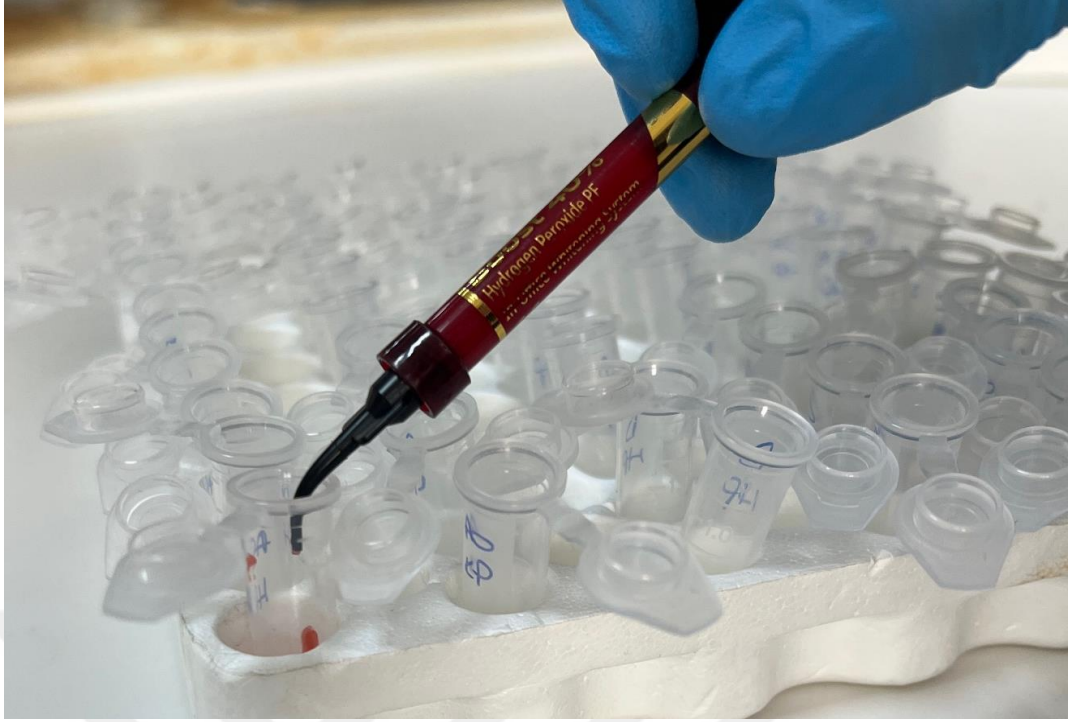
mM kalsiyum klorür (CaCl_2), 2.0 mM potasyum dihidrojenfosfat (KH_2PO_4) ve 50 mM potasyum klorür (KCl) yer almaktadır. Mikrobiyal kontaminasyonu önlemek amacıyla çözeltiliye %0.01 oranında sodyum azit (NaN_3) ilave edilmiştir. pH değeri, 1 M potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak 7.0 olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan bu solüsyon, in vitro koşullarda iyon salınımını değerlendirmek amacıyla bekletme ortamı olarak kullanılmıştır (Almqvist & Lagerlof, 1993; Almqvist & Lagerlöf, 1993).

3.4 Numunelerin Hazırlanması

Deneyisel işlem Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Her bir markaya ait braketler üç alt gruba ayrılmış ve her grupta 10'ar adet braket yer alacak şekilde YT, HP ve KP olmak üzere gruplandırılmıştır.



Fotoğraf 3.2 Analiz öncesinde deneysel gruplarda kullanılmak üzere hazırlanan steril Eppendorf tüpleri.



Fotoğraf 3.3 Beyazlatma ajanının Eppendorf tüplerine transfer edilme sürecinden bir görüntü.

Deneysel gruplarda yer alan braketlerin tüm yüzeylerini kaplayacak şekilde, her biri 1.5 mL hacme sahip Eppendorf tüplerine 0.5 mL beyazlatma ajanı eklenmiş ve tüpler oda sıcaklığında 40 dakika bekletilmiştir. Süre sonunda braketler steril distile su ile yıkanmış ve yüzeylerinde kalan beyazlatma ajanı uzaklaştırılmıştır.



Fotoğraf 3.5 Braketlerin beyazlatma ajanı içerisinde konumlandırıldığı, jel formundaki beyazlatıcı ile çevrelendiği tüplerin yakın plan görünümü.



Fotoğraf 3.6 Beyazlatma işlemi sonrasında bekletme süreci için yapay tükürük içeren Falcon tüplerinin iki farklı açıdan görünümü.

Temizlenen her bir braket, 10 mL yapay tükürük içeren 14 mL hacmindeki steril Falcon tüplere aktarılmıştır. Kontrol grubu olarak belirlenen braketler ise beyazlatıcı ajanlarla işlem görmeden doğrudan yapay tükürüğe konulmuştur.



Fotoğraf 3.7 Bekletme süresi boyunca numunelerin 37°C’de inkübasyona tabi tutulduğu inkübatör iç yerleşimi.

Tüm tüpler 28 gün boyunca 37°C’de inkübatörde bekletilmiştir. Bekletme süresi boyunca ortam koşulları düzenli olarak kontrol edilmiş ve standart koşullarda tutulmuştur.

3.5 Örneklerin Analiz İçin Hazırlanması

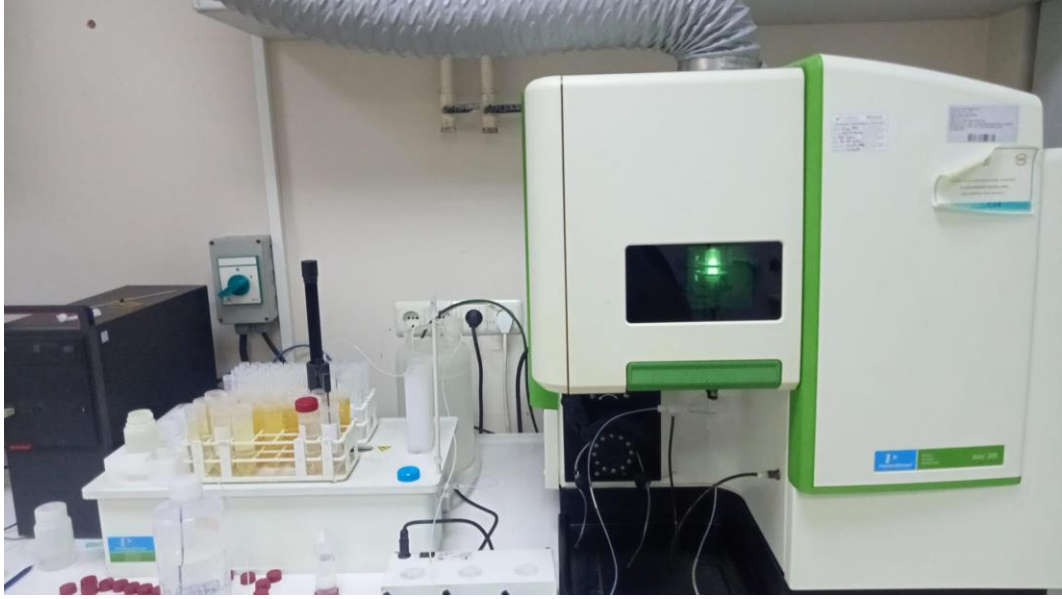
Bekletme süresi tamamlandıktan sonra, iyon salınımının değerlendirilebilmesi amacıyla yapay tükürük örnekleri analiz için hazırlanmıştır. Her grup için ayrı ayrı steril tüplerde toplanan çözeltiler, kontaminasyonu önlemek

amacıyla hava geçirmez kapaklarla kapatılmış ve 0.22 mikrometre gözenek çapına sahip membran filtreden geçirilerek partikülden arındırılmıştır. Elde edilen filtratlar, ICP-OES analizine uygun hale getirilmek üzere %1 oranında nitrik asit (HNO_3) ile asitlendirilmiş ve homojenize edilmiştir. Analizde Ni, Cr, Co, Cu, çinko (Zn), stronsiyum (Sr), Ti, kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) elementleri değerlendirilmiştir. Her iyon için üç tekrar ölçüm alınmış, ortalamalar ve standart sapmalar hesaplanarak değerlendirme yapılmıştır. Tüm işlemlerde analitik saflıkta reaktifler ve ultra saf su kullanılmış, cihaz kalibrasyonu doğrultusunda yüksek hassasiyet sağlanmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel analiz için uygun formatta kaydedilmiş ve gruplar arasında anlamlı fark olup olmadığı belirlenmek üzere analizlere dahil edilmiştir.

3.6 ICP-OES Analiz Protokolü ve Kalibrasyon Süreci

ICP-OES cihazında gerçekleştirilen analizler sırasında ölçüm doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla detaylı bir kalibrasyon ve kalite kontrol prosedürü uygulanmıştır. Ölçümlerde değerlendirilen elementler için 0–200 ppb konsantrasyon aralığında, %2 nitrik asit (HNO_3) içeren matris içerisinde kalibrasyon standartları hazırlanmıştır. Bu standartlar, matriks etkisini en aza indirmek ve doğru kantitatif analiz sağlayabilmek amacıyla, numunelerin kimyasal içeriğiyle uyumlu şekilde formüle edilmiştir.

Her metal elementi için beş farklı konsantrasyon seviyesinde kalibrasyon yapılmış ve bu seviyelerde cihazdan alınan cps (counts per second) değerleri ile konsantrasyonlar arasındaki ilişki doğrusal regresyon ile modellenmiştir. Kalibrasyon eğrilerinin doğrusallığı doğrulanmış, her element için eğim ve kesişim değerleri elde edilmiştir. Numune analizleri sırasında her bir ölçüm üç kez tekrar edilmiş, elde edilen verilerin ortalaması alınarak sonuçlar raporlanmıştır.



Fotoğraf 3.8 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry) cihazı ile örneklerdeki metal iyonlarının konsantrasyonlarının tayin edildiği analiz ünitesi.

3.7 Kalite Kontrol ve Ölçüm Güvenirliği

Analizlerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla her bir ölçüm serisinde, boş çözeltiden (blank) elde edilen arka plan sinyalleri analiz edilmiştir. Kullanılan tüm reaktifler analitik saflıkta seçilmiş, seyreltilmiş çözeltilerde ultra saf su (18.2 MΩ.cm) kullanılmıştır. Numunelerde herhangi bir kontaminasyon kaynağı bulunmadığından emin olunması için boş numuneler analiz edilmiş ve sistematik hata gözlenmemiştir.

Ölçüm hassasiyeti, bağıl standart sapma (RSD) değerleriyle kontrol edilmiş olup, tüm elementler için bu değer %5'in altında kalacak şekilde optimize edilmiştir. Kalibrasyon eğrilerinin geçerliliği bu kriterler doğrultusunda değerlendirilmiş ve ICP-OES cihazının performansı doğrulanmıştır.

3.8 Tespit ve Tayin Limitlerinin Belirlenmesi

Çalışmada değerlendirilen her bir element için tespit limiti (LOD) ve miktar tayin limiti (LOQ), kalibrasyon eğrilerinden elde edilen eğim (S) ve düşük konsantrasyona sahip örneklerin standart sapması (σ) kullanılarak aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır:

$$\text{LOD (Limit of Detection)} = (3.3 \times \sigma) / S$$

$$\text{LOQ (Limit of Quantification)} = (10 \times \sigma) / S$$

Bu hesaplamalar sayesinde, ölçüm sonuçlarının algılanabilirlik ve doğruluk sınırları net olarak belirlenmiş; düşük konsantrasyonlardaki iyon varlıkları da güvenilir biçimde raporlanmıştır. Tüm hesaplamalar, cihazın kalibrasyon yazılımı ve laboratuvar protokolüne uygun olarak yürütülmüştür.

3.9 İstatistiksel Analiz

Verilerin analizi IBM SPSS V23 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Normal dağılıma uygunluk Shapiro-Wilk testi ile değerlendirilmiştir. Normal dağılım göstermeyen değişkenler için Kruskal-Wallis H Testi, normal dağılıma uyan veriler için ise Tek Yönlü ANOVA (One-Way ANOVA) kullanılmıştır. Gruplar arası çoklu karşılaştırmalarda Dunn, Tukey ve Tamhane post-hoc testleri uygulanmıştır. Nicel veriler ortalama $\pm$ standart sapma ve ortanca (minimum–maksimum) şeklinde raporlanmıştır. Tüm analizlerde anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, farklı üreticilere ait paslanmaz çelik ortodontik braketlerin, farklı beyazlatma ajanlarına maruz bırakılmaları sonucunda oluşan metal iyon salınımı değerlendirilmiştir. İyon salınımları, 28 günlük bekletme süreci sonunda yapay tükürük örneklerinde ICP-OES cihazı ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, materyal markası ve uygulanan solüsyona göre karşılaştırılmış; elde edilen konsantrasyon değerleri istatistiksel olarak analiz edilerek anlamlı farklılıklar değerlendirilmiştir. Bulgular aşağıda her bir metal iyonu için ayrı ayrı sunulmuştur.

4.1 Ni Bulguları

Çalışmada, farklı markalara ait paslanmaz çelik braketlerden yapay tükürük ortamına salınan Ni iyon konsantrasyonları hem kullanılan beyazlatma ajanına hem de materyal markasına göre analiz edilmiştir.

YT solüsyonunda markalar arasında elde edilen ortalama Ni 231.604 µg/L değerleri karşılaştırıldığında, istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p<0,001$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 30,25 µg/L, D Discovery Smart braketlerinde 0,91 µg/L, AO Mini Master braketlerinde ise 9,33 µg/L olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, YT solüsyonunda braket markaları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğunu göstermektedir.

%45 KP solüsyonunda markalar karşılaştırıldığında da anlamlı farklılık bulunmuştur ($p<0,001$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 35,52 µg/L, D Discovery Smart'da 4,98 µg/L, AO Mini Master'da ise 24,53 µg/L olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ve AO Mini Master braketler arasında anlamlı fark bulunmazken, D Discovery Smart braketlerde her iki gruptan da anlamlı düzeyde daha düşük Ni salınımı gösterdiği belirlenmiştir.

%40 HP solüsyonunda ise markalar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,001$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 14,47 µg/L, D Discovery Smart'da 3,45 µg/L ve AO Mini Master'da 20,96 µg/L olarak belirlenmiştir. Bu grupta, 3M Solventum ve AO Mini Master arasında anlamlı bir fark saptanmazken, D Discovery Smart'ın her iki gruba kıyasla anlamlı düzeyde daha düşük salınım yaptığı görülmüştür.

3M Solventum braketlerinde, solüsyonlara göre ortalama Ni salınımları arasında anlamlı fark olduğu bulunmuştur ($p=0,036$). YT solüsyonunda ortalama

değer 30,25 µg/L, KP'de 35,52 µg/L ve HP'de 14,47 µg/L olarak ölçülmüştür. KP ve HP solüsyonları arasında anlamlı fark var iken YT solüsyon ile diğer solüsyonlar arasında anlamlı fark yoktur.

D Discovery Smart braketlerinde, solüsyona bağlı olarak Ni salınımı arasında anlamlı fark saptanmıştır ($p<0,001$). YT'de 0,91 µg/L, KP'de 4,98 µg/L ve HP'de 3,45 µg/L olarak kaydedilmiştir. YT ile KP ve HP grupları arasında anlamlı fark bulunurken, KP ve HP grupları arasında anlamlı fark tespit edilmemiştir.

AO Mini Master braketlerinde de solüsyonlara göre istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p<0,001$). YT'de ortalama değer 9,33 µg/L iken, KP'de 24,53 µg/L ve HP'de 20,96 µg/L olarak bulunmuştur. YT ile diğer iki grup arasında anlamlı fark olduğu, KP ve HP grupları arasında ise anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Materyal ve solüsyon gruplarına göre Ni (µg/L) düzeylerinin ortanca ve ortalama değerlerle karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	43,19 ± 30,45	30,25 (17,36 - 103,94) ^{aAB}	1,13 ± 1,2 ^B	0,91 (0 - 3,18) ^b	9,86 ± 2,23	9,33 (6,74 - 13,3) ^{cA}	25,864	< 0,001 ^y
KP	48,18 ± 34,08	35,52 (19,91 - 127,43) ^{aB}	5 ± 1,91 ^A	4,98 (2,3 - 9,38) ^b	28,21 ± 17,91	24,53 (11,8 - 65,82) ^{aB}	20,604	< 0,001 ^y
HP	20,25 ± 12,59	14,47 (5,85 - 39,78) ^{aA}	3,69 ± 1,09 ^A	3,45 (1,76 - 5,37) ^b	32,2 ± 26,66	20,96 (13,53 - 99,12) ^{aB}	20,286	< 0,001 ^y
Test İstatistiği	6,676		18,465		17,267			
p	0,036 ^y		< 0,001 ^x		< 0,001 ^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur; ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.2 Co Bulguları

YT solüsyonunda, farklı materyallere göre ortalama Co 228.616 µg/L değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,318$). Ortalama Co değeri AO Mini Master braketlerinde 2,13 µg/L, D Discovery Smart braketlerinde 1,84 µg/L, 3M Solventum braketlerinde ise 1,64 µg/L olarak kaydedilmiştir.

KP solüsyonunda farklı materyallere göre ortalama Co değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p=0,020$). Ortalama Co değeri 3M braketlerinde 1,96 µg/L, D Discovery Smart braketlerinde 1,58 µg/L, AO Mini Master braketlerinde ise 2,67 µg/L olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master braketleri arasında anlamlı bir fark bulunmamış; ancak D Discovery Smart ile AO Mini Master braketleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmıştır.

HP solüsyonunda da materyaller arası ortalama Co değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmiştir ($p=0,008$). Ortalama Co değeri 3M Solventum braketlerde 1,09 µg/L, D Discovery Smart'da 1,11 µg/L, AO Mini Master'da ise 2,23 µg/L olarak ölçülmüştür. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark saptanmış; ancak 3M Solventum ile diğer materyaller arasında anlamlı fark bulunmamıştır.

3M Solventum braketlerinde, solüsyona göre değişen Co salınımında anlamlı farklılık gözlenmemiştir ($p=0,092$). Ortalama değerler YT'de 1,64 µg/L, KP'de 1,96 µg/L ve HP'de 1,09 µg/L olarak ölçülmüştür.

D Discovery Smart braketlerinde ise solüsyona bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı fark tespit edilmiştir ($p=0,019$). Bu grupta YT'de ortalama değer 1,93 µg/L, KP'de 1,62 µg/L, HP'de ise 1,09 µg/L'dir. YT ile KP arasında anlamlı fark yokken, YT ile HP arasında anlamlı fark bulunmuştur. KP ile HP arasında anlamlı fark saptanmamıştır.

AO Mini Master braketlerinde solüsyona göre ortalama Co değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,318$). Bu grupta YT'de ortalama 2,13 µg/L, KP'de 2,67 µg/L ve HP'de 2,23 µg/L olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.2 Materyal ve solüsyon gruplarına göre Co (µg/L) ortanca değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	1,79 ± 0,54	1,64 (1,05 - 2,57)	1,93 ± 0,54 ^B	1,84 (1,17 - 2,96)	2,25 ± 0,82	2,13 (0,98 - 4,25)	2,364	0,307 ^y
KP	2,26 ± 1,77	1,96 (0,11 - 6,64) ^{ab}	1,62 ± 0,64 ^{AB}	1,58 (0,67 - 2,62) ^a	3,45 ± 2,03	2,67 (1,88 - 7,76) ^b	7,804	0,020^y
HP	1,26 ± 0,68	1,09 (0,13 - 2,67) ^b	1,09 ± 0,69 ^A	1,11 (0 - 2,01) ^b	2,28 ± 1,12	2,23 (0 - 4,48) ^a	9,619	0,008^y
Test İstatistiği	4,772		4,581		2,294			
p	0,092 ^y		0,019^x		0,318 ^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur; ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.3 Cr Bulguları

YT solüsyonunda farklı markalara ait paslanmaz çelik braketlerin Cr 267.716 µg/L ortanca değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu saptanmıştır ($p<0,001$). AO Mini Master braketlerinde ortanca değer 2,13 µg/L, D Discovery Smart braketlerinde 2,04 µg/L ve 3M Solventum braketlerinde 2,35 µg/L olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ve D Discovery Smart grupları arasında anlamlı fark bulunmazken, D Discovery Smart ile AO Mini Master grubu karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük Cr salınımı gösterdiği belirlenmiştir.

KP solüsyonunda materyale göre ortanca Cr değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,002$). AO Mini Master braketlerinde Cr ortanca değeri 29,56 µg/L, D Discovery Smart'de 3,14 µg/L, 3M Solventum'da ise 3,62 µg/L olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ve D Discovery Smart arasında anlamlı fark saptanmazken, 3M Solventum ile AO Mini Master ve D Discovery Smart ile AO Mini Master grubu arasında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde fark olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, KP solüsyonu ile temas halinde AO Mini Master grubunda daha yüksek Cr salınımı tespit edilmiştir.

HP solüsyonunda da materyale göre ortanca Cr değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur ($p<0,001$). AO Mini Master grubunda 12,7 µg/L, D Discovery Smart grubunda 1,11 µg/L, 3M'de ise 3,39 µg/L Cr salınımı ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında fark gözlenmezken, 3M Solventum ile AO Mini Master ve D Discovery Smart ile AO Mini Master grubu arasında anlamlı fark saptanmıştır. AO Mini Master grubu bu gruplar arasında en yüksek Cr salınımını göstermiştir.

3M Solventum braketlerinde farklı solüsyonlara göre Cr salınımında istatistiksel fark saptanmıştır ($p=0,001$). YT'de ortanca değer 2,35 µg/L, KP'de 3,62 µg/L ve HP'de 3,39 µg/L olarak ölçülmüştür. YT ile KP ve HP grupları arasında anlamlı fark bulunmuştur. KP ile HP grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark yoktur.

D Discovery Smart braketlerinde de solüsyona bağlı olarak Cr salınımında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,021$). YT'de 2,04 µg/L, KP'de 3,14 µg/L, HP'de ise 2,67 µg/L olarak ölçülmüştür. YT ile KP ve HP grupları arasında anlamlı fark bulunurken, KP ile HP arasında anlamlı fark gözlenmemiştir.

AO Mini Master grubunda ise solüsyona bağı olarak Cr salınımı açısından anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,006$). YT'de ortalama Cr değeri 3,71 $\mu\text{g/L}$, KP'de 29,56 $\mu\text{g/L}$ ve HP'de 12,7 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. YT ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yok iken YT ile KP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. KP ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.



Tablo 4.3 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cr (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	2,44 ± 0,62	2,35 (1,23 - 3,57) ^{bB}	2,07 ± 0,4	2,04 (1,41 - 2,74) ^{bA}	16,81 ± 42,01	3,71 (2,69 - 136,37) ^{aB}	18,418	< 0,001 ^y
KP	4,18 ± 2,17	3,62 (2,71 - 10,15) ^{bA}	4,01 ± 2,86	3,14 (1,78 - 11,29) ^{bB}	58,15 ± 73,41	29,56 (3,69 - 229,3) ^{aA}	12,312	0,002 ^y
HP	4,48 ± 3,48	3,39 (2,65 - 14,3) ^{bA}	3,52 ± 2,07	2,67 (1,9 - 8,39) ^{bAB}	22,77 ± 23,84	12,7 (6,25 - 84,57) ^{aA}	17,631	< 0,001 ^y
Test İstatistiği	13,412		7,688		10,392			
p	0,001 ^y		0,021 ^y		0,006 ^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur; ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.4 Cu Bulguları

YT solüsyonunda materyallere göre ortalama Cu 327.393 ($\mu\text{g/L}$) düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark tespit edilmiştir ($p<0,001$). AO Mini Master braketlerinde ortalama değer 30,03 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 8,79 $\mu\text{g/L}$ ve 3M Solventum braketlerinde 7,91 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında anlamlı fark gözlenmemişken, 3M Solventum ile AO Mini Master arasında ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur.

KP solüsyonunda materyallere göre Cu düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,002$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 10,7 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 8,23 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master braketlerinde 47,22 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında anlamlı fark bulunmazken, 3M Solventum ile AO Mini Master arasında ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark belirlenmiştir.

HP solüsyonunda materyallere göre ortalama Cu düzeyleri açısından istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmiştir ($p<0,001$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 8,44 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 7,69 $\mu\text{g/L}$, AO Mini Master'da ise 38,83 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında anlamlı fark saptanmazken, her iki grup da AO Mini Master ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermiştir.

3M Solventum braketlerinde solüsyonlara göre ortalama Cu düzeyleri arasında istatistiksel anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,072$). YT grubunda ortalama değer 7,91 $\mu\text{g/L}$, KP grubunda 10,69 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 8,32 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

D Discovery Smart braketlerinde solüsyonlara göre ortalama Cu düzeyleri arasında anlamlı fark saptanmamıştır ($p=0,564$). YT grubunda ortalama değer 8,79 $\mu\text{g/L}$, KP'de 8,32 $\mu\text{g/L}$ ve HP'de 7,69 $\mu\text{g/L}$ olarak belirlenmiştir.

AO Mini Master braketlerinde ise solüsyonlara göre ortalama Cu düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,091$). YT grubunda ortalama değer 30,03 $\mu\text{g/L}$ iken, KP grubunda 47,22 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 38,83 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.4 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cu (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	6,56 ± 2,63	7,91 (2,06 - 8,8) ^b	8,41 ± 1,73	8,79 (3,85 - 9,75) ^b	29,1 ± 5,06	30,03 (22,03 - 38,66) ^a	21,378	< 0,001 ^y
KP	10,7 ± 5,5 ^b	10,68 (3,02 - 22,54)	8,23 ± 5,12 ^b	8,32 (2,35 - 14,52)	47,22 ± 27,47 ^a	36,07 (13,3 - 93,26)	9,468	0,002 ^x
HP	8,44 ± 0,94 ^b	8,31 (7,04 - 9,77)	7,63 ± 1,76 ^b	7,69 (5,37 - 11,25)	38,83 ± 20,46 ^a	35,18 (7,57 - 65,43)	11,426	0,001 ^x
Test İstatistiği	5,257		1,146		2,895			
p	0,072 ^y		0,564 ^y		0,091 ^x			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur, ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.5 Sr Bulguları

YT solüsyonunda farklı materyallere göre ortalama Sr 407.771 ($\mu\text{g/L}$) düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,093$). AO Mini Master braketlerinde ortalama değer 104,15 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 75,84 $\mu\text{g/L}$ ve 3M Solventum braketlerinde 76,54 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

KP solüsyonunda materyaller arasında Sr düzeyleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p<0,001$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 102,58 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 74,9 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master'da 135,66 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında anlamlı fark görülmezken, 3M Solventum ile AO Mini Master ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur.

HP solüsyonunda da materyaller arasında Sr düzeyleri açısından anlamlı fark belirlenmiştir ($p=0,003$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 72,49 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 66,66 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master'da 139,99 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

3M Solventum braketlerinde solüsyonlara göre Sr düzeyleri arasında anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,088$). YT grubunda ortalama değer 76,54 $\mu\text{g/L}$, KP grubunda 102,58 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 72,49 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

D Discovery Smart braketlerinde de solüsyonlara göre Sr düzeyleri arasında anlamlı fark tespit edilmemiştir ($p=0,088$). YT grubunda ortalama değer 75,84 $\mu\text{g/L}$, KP grubunda 74,9 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 66,66 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir.

AO Mini Master braketlerinde ise solüsyonlar arasında Sr düzeyleri bakımından anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,016$). YT grubunda ortalama değer 104,15 $\mu\text{g/L}$, KP grubunda 135,66 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 139,99 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. YT ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yok iken YT ile KP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. KP ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 4.5 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Sr (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	82,38 ± 29,81	76,54 (40,63 - 142,31)	78,43 ± 21,2	75,84 (50,5 - 107,38)	106,25 ± 52,46	104,15 (24,64 - 235,36) ^B	4,756	0,093 ^y
KP	121,81 ± 104,83	102,58 (17 - 403,41) ^b	70,44 ± 32,05	74,9 (21,65 - 111,23) ^b	139,36 ± 21,02	135,66 (121,33 - 191,6) ^{aA}	16,485	<0,001 ^y
HP	72,49 ± 36,07	66,66 (21,42 - 164,89) ^{ab}	50,38 ± 29,65	50,03 (-20,41 - 93,64) ^b	141,39 ± 69,1	139,99 (28,04 - 282,29) ^{aAB}	11,569	0,003 ^y
Test İstatistiği	4,446		2,66		8,323			
p	0,108 ^y		0,088 ^x		0,016 ^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur, ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.6 Zn Bulguları

YT solüsyonunda farklı braket materyallerine göre ortalama Zn 206.200 ($\mu\text{g/L}$) düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,217$). AO Mini Master braketlerinde ortalama değer 21,78 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 23,41 $\mu\text{g/L}$ ve 3M Solventum braketlerinde 19,29 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

KP solüsyonunda materyaller arasında Zn düzeyleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p=0,947$). AO Mini Master grubunda ortalama değer 26,15 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 26,47 $\mu\text{g/L}$ ve 3M Solventum'da 27,23 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir.

HP solüsyonunda da farklı materyaller arasında ortalama Zn düzeyleri açısından anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,256$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 18,9 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 18,26 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master grubunda 15,09 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir.

Ancak, 3M Solventum braketlerinde farklı solüsyonlara göre ortalama Zn düzeyleri karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmiştir ($p<0,067$). YT grubunda ortalama değer 19,29 $\mu\text{g/L}$, KP grubunda 27,23 $\mu\text{g/L}$ ve HP grubunda 18,9 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

D Discovery Smart braketlerinde solüsyonlara göre ortalama Zn değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark tespit edilmiştir ($p=0,019$). Bu grupta ortalama değer YT'de 23,41 $\mu\text{g/L}$, KP'de 26,47 $\mu\text{g/L}$ ve HP'de 18,26 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir.

AO Mini Master braketlerinde solüsyonlara göre ortalama Zn değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu tespit edilmiştir ($p<0,001$). YT'de ortalama değer 21,78 $\mu\text{g/L}$, KP'de 25,93 $\mu\text{g/L}$ ve HP'de 15,09 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir.

YT ile KP ve YT ile HP grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmazken, KP ile HP grupları arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.6 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Zn (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

3M Solventum			D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	19,5 ± 1,34 ^A	19,29 (17,73 - 22,22)	21,88 ± 3,59	23,41 (17,27 - 26,09) ^{AB}	20,5 ± 6,93	21,78 (2,37 - 27,76) ^{AB}	2,975	0,226 ^y
KP	27,23 ± 9,44 ^B	24,58 (18,62 - 46,65)	26,47 ± 5,89	24,19 (20,45 - 40,04) ^B	26,15 ± 4,31	25,93 (20,1 - 33,44) ^B	0,054	0,947 ^x
HP	19,16 ± 2,65 ^A	18,9 (15,29 - 23,96)	16,87 ± 5,78	18,26 (2,45 - 23,47) ^A	13,89 ± 7,06	15,09 (0,44 - 21,91) ^A	2,728	0,256 ^y
Test İstatistiği	3,273		12,41		14,201			
p	0,067 ^x		0,002^y		0,001^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur; ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.7 Ti Bulguları

YT solüsyonunda farklı braket materyallerine göre ortalama Ti 334.940 ($\mu\text{g/L}$) değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmıştır ($p=0,019$). AO Mini Master grubunda ortalama değer $1,75 \mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da $0 \mu\text{g/L}$ ve 3M Solventum grubunda $2,23 \mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master ile 3M Solventum arasında anlamlı fark bulunmazken, D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmiştir.

KP solüsyonunda materyallere göre ortalama Ti düzeyleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur ($p=0,002$). 3M Solventum grubunda ortalama değer $2,33 \mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da $0 \mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master'da $5,6 \mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında anlamlı fark bulunmazken, D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark saptanmıştır.

HP solüsyonunda da materyaller arasında ortalama Ti düzeyleri açısından istatistiksel olarak anlamlı fark elde edilmiştir ($p=0,003$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer $4,62 \mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da $0 \mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master'da $4,79 \mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında, ayrıca D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark saptanmıştır.

3M Solventum braketlerinde solüsyonlara göre ortalama Ti düzeyleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,125$). YT'de ortalama değer $2,23 \mu\text{g/L}$, KP'de $2,33 \mu\text{g/L}$ ve HP'de $4,62 \mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

D Discovery Smart braketlerinde solüsyona bağlı olarak ortalama Ti düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmiştir ($p=0,012$). Tüm gruplarda (YT, KP, HP) ortalama değer $0 \mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. Ancak post-hoc testlerde HP ile diğer gruplar arasında anlamlı fark saptanmıştır. YT ile KP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yok iken YT ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. KP ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

AO Mini Master grubunda solüsyonlara göre ortalama Ti düzeyleri arasında anlamlı fark saptanmamıştır ($p=0,278$). YT'de ortalama değer $1,75 \mu\text{g/L}$, KP'de $5,69 \mu\text{g/L}$ ve HP'de $4,79 \mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.7 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Ti (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

3M Solventum			D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	1,87 ± 1,75	2,23 (0 - 4,19) ^{ab}	0 ± 0	0 (0 - 0) ^{bB}	3,07 ± 3,68	1,75 (0 - 10,41) ^a	7,949	0,019^y
KP	3,14 ± 3,48	2,33 (0 - 10,05) ^{ab}	0 ± 0	0 (0 - 0) ^{bB}	5,6 ± 4,2	5,69 (0 - 11,59) ^a	12,646	0,002^y
HP	4,27 ± 2,52	4,62 (0 - 8,55) ^a	0,64 ± 0,84	0 (0 - 1,87) ^{bA}	5,35 ± 4,99	4,79 (0 - 16,5) ^a	11,694	0,003^y
Test İstatistiği	4,155		8,866		2,558			
p	0,125 ^y		0,012^y		0,278 ^y			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur; ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.8 Pb Bulguları

YT solüsyonunda materyallere göre ortalama Pb 220.353 ($\mu\text{g/L}$) düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu tespit edilmiştir ($p=0,006$). 3M Solventum braketlerinde ortalama değer 5,23 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart braketlerinde 0 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master braketlerinde 3,73 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. 3M Solventum ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmezken, 3M Solventum ile D Discovery Smart ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu belirlenmiştir.

KP solüsyonunda da materyallere göre ortalama Pb düzeylerinde anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,001$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 5,33 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart grubunda 0 $\mu\text{g/L}$, AO Mini Master grubunda ise 8,69 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında fark anlamlı bulunurken, 3M Solventum ile AO Mini Master ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında da anlamlı fark olduğu belirlenmiştir.

HP solüsyonunda da benzer şekilde istatistiksel olarak anlamlı fark tespit edilmiştir ($p=0,003$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 7,62 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart'da 2,27 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master'da 7,79 $\mu\text{g/L}$ olarak saptanmıştır. 3M Solventum ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yok iken 3M Solventum ile D Discovery Smart arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

3M Solventum braketlerinde, farklı solüsyonlara göre Pb düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,137$). YT'de ortalama değer 5,23 $\mu\text{g/L}$, KP'de 5,33 $\mu\text{g/L}$, HP'de 7,62 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir.

D Discovery Smart braketlerinde solüsyonlara bağlı olarak ortalama Pb düzeyleri arasında anlamlı fark olduğu belirlenmiştir ($p=0,015$). YT ve KP gruplarında ortalama değer 0 $\mu\text{g/L}$ iken, HP grubunda 2,27 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. YT ile KP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yok iken YT ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. KP ile HP arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

AO Mini Master braketlerinde ise solüsyonlara göre Pb düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,243$). YT'de ortalama değer 4,75 $\mu\text{g/L}$, KP'de 8,1 $\mu\text{g/L}$ ve HP'de 8,18 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.8 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Pb (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	3,9 ± 3,02	5,23 (0 - 7,19) ^a	0,08 ± 0,25	0 (0 - 0,8) ^{bB}	4,75 ± 4,95	3,73 (0 - 13,41) ^a	10,138	0,006^y
KP	5,21 ± 4,54	5,33 (0 - 13,05) ^{ab}	0,28 ± 0,87	0 (0 - 2,77) ^{bAB}	8,1 ± 5,01	8,69 (0,14 - 14,59) ^a	14,753	0,001^y
HP	6,97 ± 3,18	7,62 (0 - 11,55) ^a	2,3 ± 2,2	2,27 (0 - 4,87) ^{bA}	8,18 ± 5,23	7,79 (1,23 - 19,5) ^a	11,533	0,003^y
Test İstatistiği	3,983		8,436		1,49			
p	0,137 ^y		0,015^y		0,243 ^x			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur, ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

4.9 Cd Bulguları

YT solüsyonunda materyallere göre ortalama Cd 228.802 ($\mu\text{g/L}$) düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu belirlenmiştir ($p<0,001$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 0,89 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart grubunda 0 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master grubunda 1,38 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir. 3M Solventum ile D ve AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

KP solüsyonunda da materyaller arası ortalama Cd düzeylerinde anlamlı fark saptanmıştır ($p<0,001$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 0,3 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart grubunda 0 $\mu\text{g/L}$, AO Mini Master grubunda ise 1,26 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

HP solüsyonunda da materyaller arasında ortalama Cd düzeyleri açısından anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,001$). 3M Solventum grubunda ortalama değer 0,47 $\mu\text{g/L}$, D Discovery Smart grubunda 0 $\mu\text{g/L}$ ve AO Mini Master grubunda 1,24 $\mu\text{g/L}$ olarak elde edilmiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

3M Solventum braketlerinde farklı solüsyonlara göre ortalama Cd düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p=0,945$). YT’de ortalama değer 0,89 $\mu\text{g/L}$, KP’de 0,3 $\mu\text{g/L}$ ve HP’de 0,47 $\mu\text{g/L}$ olarak saptanmıştır.

D Discovery Smart braketlerinde ise solüsyonlara göre anlamlı fark görünse de yapılan ikili karşılaştırmalarda fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,040$). Tüm solüsyon gruplarında ortalama değer 0 $\mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüştür.

AO Mini Master braketlerinde ise farklı solüsyonlara göre ortalama Cd düzeylerinde anlamlı fark gözlenmemiştir ($p=0,930$). YT’de ortalama değer 1,29 $\mu\text{g/L}$, KP’de 1,23 $\mu\text{g/L}$ ve HP’de 1,24 $\mu\text{g/L}$ olarak kaydedilmiştir.

Tablo 4.9 Materyal ve solüsyon değerlerine göre Cd (µg/L) değerlerinin karşılaştırılması

	3M Solventum		D Discovery Smart		AO Mini Master		Test İstatistiği	p
	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)	Ortalama(s.sapma)	Ortanca(min-mak)		
YT	0,71 ± 0,58	0,89 (0 - 1,59) ^{ab}	0 ± 0	0 (0 - 0) ^b	1,29 ± 0,54	1,38 (0 - 2,03) ^a	17,200	< 0,001 ^y
KP	0,62 ± 0,7	0,3 (0 - 1,66) ^{ab}	0 ± 0	0 (0 - 0) ^b	1,23 ± 0,31	1,26 (0,68 - 1,58) ^a	16,152	< 0,001 ^y
HP	0,6 ± 0,42	0,47 (0 - 1,19) ^{ab}	0,05 ± 0,12	0 (0 - 0,39) ^b	1,24 ± 0,28	1,33 (0,69 - 1,54) ^a	21,420	< 0,001 ^y
Test İstatistiği	0,114		6,423		0,072			
p	0,945 ^y		0,040 ^y		0,930 ^x			

^x Tek yönlü ANOVA; ^y Kruskal Wallis H Testi; Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip materyaller arasında fark yoktur, ^{A-B}: Aynı harfe sahip solüsyonlar arasında fark yoktur. YT:Yapay tükürük, KP: Karbamid peroksit, HP: Hidrojen peroksit

5. TARTIŞMA

Bu in vitro çalışmada, ortodontik tedavi sırasında kullanılan farklı üreticilere ait paslanmaz çelik braketlerden, ofis tipi beyazlatma ajanlarıyla etkileşim sonrasında yapay tükürük ortamına salınan metal iyon miktarları değerlendirilmiştir. %40 HP ve %45 KP içeren beyazlatıcı ajanlar kullanılarak, braketlerin bu kimyasallarla etkileşimi sonrası meydana gelen iyon salınımı ICP-OES cihazı ile kantitatif olarak analiz edilmiştir. Çalışmada 3 farklı tip paslanmaz çelik braket ve 9 farklı metal iyonu (Ni, Cr, Co, Sr, Cu, Zn, Ti, Pb, Cd) dikkate alınmış hem materyal farkı hem de kullanılan ajanlara göre oluşan farklılıklar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, paslanmaz çelik braketlerin ofis tipi beyazlatma ajanlarına maruz bırakılması durumunda meydana gelen iyon salınımını ve bu durumun potansiyel biyolojik etkilerini ortaya koyarak malzeme güvenliği açısından değerlendirilebilecek veriler sunmaktadır.

Literatürde Ni, alerjik kontakt dermatitin en yaygın nedenlerinden biri olarak tanımlanmış ve diğer tüm metallerin toplamından daha fazla alerjik reaksiyona yol açtığı bildirilmiştir. Albert Einstein/Montefiore Tıp Merkezi'nde yapılan bir çalışmada 29 ortodonti hastası değerlendirilmiş, %18,5'inde Ni duyarlılığı saptanmış ve bu hastaların tamamının kadın olduğu belirtilmiştir (Bass ve ark., 1993). Ayrıca üç aylık ortodontik tedavi süresinde başlangıçta negatif olan iki hastada yama testinin pozitifleştiği gözlenmiş ve rutin ortodontik tedavide kullanılan Ni içeren apaceylere uzun süreli maruziyetin duyarlılık gelişimine neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Greppi ve arkadaşları (Greppi, 1991), Ni'ye duyarlılığı olan hastalarda ağız içinde yüksek nikel ile karşılaştıklarında şiddetli lokal reaksiyon tespit etmişler ve tek bir hastada ise ağız dışında parmak ve ellerinde ürtiker şeklinde kızarıklıklar gözlemlemişlerdir.

Beyazlatıcı ajanların sabit ortodontik apaceylerle birlikte kullanımında, yalnızca estetik etkinlik değil, aynı zamanda bu ajanların diş dokusu ve ortodontik materyaller üzerindeki potansiyel biyolojik ve kimyasal etkileri de dikkatle değerlendirilmelidir. Gomes ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan in vivo çalışmada, %35 HP ile uygulanan ofis tipi beyazlatma işlemi sonrasında, braketlerin altında kalan alanlarda dahi anlamlı renk açılması elde edildiği bildirilmiştir (Gomes ve ark., 2017). Benzer şekilde, Haywood ve arkadaşları (Haywood ve ark., 1990) tarafından gerçekleştirilen in vitro bir çalışmada da, %10

KP içeren gece plağı ile uygulanan beyazlatma işleminin, çözeltinin doğrudan temas etmediği kontrol bölgelerinde bile renk değişimine neden olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemelerde, mine yüzey dokusunda işlem gören ve kontrol alanları arasında herhangi bir fark tespit edilmemiş, yüzeyde asitleme bulgularına rastlanmamıştır. Al-Salehi'nin ve Sardarian ve ark.'larının yaptıkları çalışmalarda beyazlatıcı ajanların metal içerikli materyallerde iyon salınımını artırabileceği belirtilmiştir (Al-Salehi, 2009; Sardarian ve ark., 2023).

Yapılan araştırmalar, sabit ortodontik apareylerin elektrokimyasal ayrışma mekanizması ile Ni ve Cr iyonlarını tükürüğe saldıgını göstermektedir. Bu süreç, serbest radikallerin oluşumuna ve DNA bazında kimyasal değişikliklere yol açmaktadır (Hafez ve ark., 2011).

Faccioni ve arkadaşlarının in vivo çalışmasında, sabit ortodontik tedavi uygulanan bireylerin tükürüğünde Ni ve Co iyonlarının kontrol grubuna göre 3,4 ve 2,8 kat daha fazla bulunduğu, ayrıca DNA hasarıyla ilişkili hücresel toksisiteye neden olabileceği bildirilmiştir (Faccioni ve ark., 2003). Bu bulgu, bizim çalışmamızda AO Mini Master braketlerinin tüm solüsyon gruplarında Co iyonu açısından göreceli olarak yüksek salınım göstermesiyle örtüşmektedir. Dolayısıyla, çalışmamızda değerlendirilen materyallerin biyouyumluluğu açısından özellikle Ni ve Co salınımı klinik olarak dikkate alınmalıdır.

Fernández-Miñano ve arkadaşları (Fernández-Miñano ve ark., 2011) tarafından yapılan in vivo bir çalışmada, farklı ortodontik alaşımlardan (paslanmaz çelik, Ti ve Ni içermeyen) salınan metal iyonlarının biyouyumluluğu ve genotoksik etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, paslanmaz çelik ve Ni içermeyen alaşımların oral mukozada daha fazla DNA hasarı oluşturduğunu, titanyum alaşımının ise en yüksek biyouyumluluğu gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, metal iyonlarının yalnızca salınım miktarlarının değil, biyolojik etkilerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Hayvan deneyi yapılan bir çalışmada (Gjerdet ve ark., 1987), kullanılmamış tellerin herhangi bir doku reaksiyonu oluşturmadığı, ancak gümüş lehimlenmiş tellerin özellikle Ni duyarlı hayvanlarda belirgin inflamatuvar yanıt ve sitotoksisiteye yol açtığı gösterilmiştir. Bu bulgular, lehim bölgelerinden çözünebilen toksik bileşenlerin biyouyumluluk açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Her iki çalışmada da Ni biyouyumluluk açısından en kritik element olarak öne çıkarken,

lehim bölgelerine özgü toksik salınımın iyon salınımının nicel miktarından bağımsız olarak lokal doku reaksiyonlarına neden olabileceği görülmektedir. Bu durum, ortodontik apareylerde yalnızca ana gövde materyalinin değil, bağlantı ve lehim bölgelerinin de biyouyumluluk değerlendirmelerinde dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Kadmiyum (Cd), canlı organizmalar için hiçbir fizyolojik işlevi olmayan son derece toksik bir ağır metaldir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ve ABD Ulusal Toksikoloji Programı tarafından insan kanserojeni olarak sınıflandırılmıştır (NTP, 2024; WHO, 2020). Cd maruziyeti, hücrelerde oksidatif stres ve iltihaplanma tepkilerini tetikleyerek DNA hasarına yol açabilir. Bu mekanizmalar kadmiyumun genotoksik (DNA'yı hasara uğratici) etkilerine ve uzun vadede kanser oluşturma potansiyeline katkıda bulunur (Badawi ve ark., 2024). Ortodonti alanında, kadmiyumun önemi özellikle geçmişte kullanılan bazı lehim alaşımları ile ilgilidir. Eskiden ortodontik apareylerin yapımında kullanılan gümüş lehimler kadmiyum içerebiliyordu ve bu lehimlerden zamanla Cd iyonları salınarak tükürüğe karışabildiği bildirilmiştir (Freitas ve ark., 2011).

Nitekim bir çalışmada hızlı genişletme apareyi (hyrax) yerleştirilen çocukların tükürüğünde, aparey takıldıktan hemen 10 dakika sonra Cd düzeylerinin belirgin şekilde yükseldiği saptanmıştır (Freitas ve ark., 2011). Cd ve benzeri metallerin ortama salınması biyouyumluluk açısından endişe vericidir; çünkü bu metaller akut veya kronik toksik etkilere yol açarak alerji, mukoza irritasyonu veya sistemik zehirlenme riskini artırabilir. Özellikle Cd, kan dolaşımına geçmesi halinde karaciğer, böbrek, akciğer gibi organlarda birikerek hematopoietik, ürogenital ve sindirim sistemlerinde ciddi bozukluklar oluşturabilir (Freitas ve ark., 2011). Sonuç olarak, Cd iyonlarının ortodontik materyallerden salınımı söz konusu olduğunda, bunun genotoksik ve sitotoksik etkileri nedeniyle hem lokal (ağız dokularında) hem de sistemik sağlık riskleri yaratabileceği anlaşılmaktadır. Bizim çalışmamızda AO Mini Master braketlerinden salınan Cd düzeylerinin görece yüksek bulunması klinik açıdan dikkate alınmalıdır. D Discovery Smart grubunda Cd salınımının hiç tespit edilmemesi ise biyouyumluluk açısından avantaj olarak değerlendirilebilir. Genel olarak, Cd salınımı düşük düzeylerde kalmakla birlikte, özellikle belirli materyallerde yüksek değerler göstermesi, materyal seçiminin klinik güvenlik açısından kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Sr'nin sistemik toksik etkisinin düşük olduğu bildirilmiştir ve bu durum, onun birçok dental materyalin radyoopasitesini artırmada uygun bir element olmasını sağlamaktadır. Kalsiyuma olan benzerliği sayesinde Sr, dental materyallerde kalsiyumun yerine geşebilme kapasitesine sahiptir (Pelepenko ve ark., 2022). 1980'li yıllarda Sr'nin cam içerisinde radyoopaklaştırıcı bir ajan olarak kullanılabileceğini tanımlayan bir patent alınmıştır (Abdalla ve ark., 2024) ve bu cam daha sonra dental rezin kompozit restoratif materyallerde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır.

Sr bileşiklerinin farklı bakteri türlerine karşı değişen derecelerde antibakteriyel etkilere sahip olduğu gösterilmiştir. Bu bileşikler, bakteri büyümesini inhibe edebilmekte, sitoplazmik membran geçirgenliğini azaltabilmekte ve bakteri kromozomlarının replikasyonu ile hücresel metabolizmayı yavaşlatabilmektedir (Alkhraisat ve ark., 2010; Guida ve ark., 2003). Son yıllarda Sr, dental ve ortopedik biyomalzemelere sekonder şrk riskini azaltmak amacıyla dahil edilmektedir (Jayasree ve ark., 2017). Ayrıca, vertebra kompresyon kırıklarında minimal invaziv yöntemlerle antimikrobiyal ajanların verilmesini sağlamak amacıyla enjekte edilebilir kemik simanlarında kullanıldığı, implantlarla ilişkili enfeksiyonları önlemek için Sr kaplı implantların da araştırıldığı bildirilmiştir (Alshammari ve ark., 2021; Brauer ve ark., 2013).

Oral mukozada elektrogalvanizmaya bağlı geliştiği düşünülen lezyonların rapor edildiği uzun dönem bir takip çalışmasında (Bánóczy ve ark., 1979), toplam 32 hastada lökoplaki veya oral liken planus benzeri mukozal değişiklikler gözlenmiş ve bu olguların beşinde malign transformasyon bildirilmiştir. Araştırmacılar, bu tür değişiklikler için "elektrogalvanik beyaz lezyonlar" terimini önermiştir. Bu bulgular, ağız ortamında metal alaşımlar arasında oluşan galvanik akımların yalnızca iyon salınımına değil, mukozal dokularda klinik olarak anlamlı lezyonlara da yol açabileceğini göstermektedir.

Ortodontik materyallerden iyon salınımını değerlendirmeye yönelik literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır ve her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları vardır. Erken dönem çalışmalarda genellikle Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi (AAS) tercih edilmiştir (Baydaş & Yavuz, 2005; Gürsoy ve ark., 2005; Huang ve ark., 2001; Matos de Souza & Macedo de Menezes, 2008; Staffolani ve ark., 1999). AAS yöntemi, özellikle tek element analizlerinde sıklıkla tercih edilen, kullanımı görece kolay ve maliyeti düşük bir tekniktir (Alp, 2008).

Bu yöntem, belirli metalleri düşük konsantrasyon düzeylerinde (genellikle ppm mertebesinde) tespit etmede yeterli duyarlılığa sahip olmakla birlikte, her ölçümde yalnızca tek bir elementi analiz edebilmesi nedeniyle çok elementli örneklerde zaman alıcıdır ve tespit limitleri plazma tabanlı tekniklere kıyasla daha yüksektir (Nayak ve ark., 2015).

Teknolojik gelişmelerle birlikte bazı çalışmalarda ICP-MS kullanılmıştır (Al-Salehi, 2009; Al-Salehi ve ark., 2006; Kobayashi ve ark., 2007; Koçak, 2017; Kuhta ve ark., 2009; Penarrieta-Juanito ve ark., 2019). ICP-MS, atomik spektroskopi yöntemleri içinde en yüksek hassasiyeti sağlayan tekniktir ve eşzamanlı olarak birden fazla elementi tespit edebilir. Ayrıca ICP-MS, ICP- OES'e kıyasla daha az numune ile analiz yapma olanağı tanıyarak ortodontik biyomateriyallerden salınan eser elementlerin takibinde avantaj sağlamaktadır (Nayak ve ark., 2015). Bununla birlikte, ICP-MS cihazları en yüksek maliyetli ve kompleks sistemler olup, argon plazma gazı tüketimi, özel bakım gereksinimleri ve kütleli girişimlerin yönetimi gibi pratik zorluklar barındırmaktadır (Henderson, 2025).

Diğer yandan indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi ICP-OES/ICP-AES hem duyarlılık hem de pratiklik açısından literatürde giderek daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (Danaei ve ark., 2011; Eliades ve ark., 2004; Sardarian ve ark., 2023). ICP-OES tekniği, AAS'ye göre duyarlılığı belirgin biçimde artırmakta ve eş zamanlı çoklu element analizi yapabilmektedir; bu sayede ortodontik alaşımlardan salınan birden fazla metal iyonu aynı örnek içerisinde hızlı şekilde ölçülebilir (Henderson, 2025). Geniş bir dinamik aralığa sahip olan ICP-OES, çoğu element için düşük ppb düzeylerinde algılama olanağı sağlayarak AAS'ye kıyasla daha iyi bir duyarlılık sunar ancak cihazın daha karmaşık oluşu ve argon gazı gibi gereklilikler nedeniyle başlangıç ve işletim maliyetleri daha yüksektir (Analytical).

Bu çalışmada ICP-OES yönteminin tercih edilmesinin nedeni, incelenen element çeşitliliğinin geniş olması ve hem toksik elementlerin (Pb, Cd gibi) hem de biyoyumumluluk açısından kritik majör elementlerin (Ni, Cr, Fe, Co, Zn, Sr gibi) aynı anda güvenilir şekilde değerlendirilebilmesidir. Ayrıca ICP-OES, örnek hazırlama ve ölçüm sürecinde sağladığı pratiklik ile, çok sayıda numunenin değerlendirildiği bekletme temelli araştırmalarda önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu yönüyle, literatürde kullanılan AAS ve ICP-MS yöntemlerine kıyasla, ICP-OES çalışmamız

için hem metodolojik açıdan en uygun hem de sonuçların klinik açıdan güvenilirliğini artıran bir seçim olmuştur.

Kobayashi ve arkadaşları, Ni-Ti ark tellerini DLC film ile kapladıkları deneysel çalışmada, nikel salınımını 6 kat azalttıklarını bildirmişlerdir (Kobayashi ve ark., 2007). Bu sonuç, malzeme yüzeyinin modifikasyonu ile iyon salınımının azaltılabileceğini gösterirken, bizim çalışmamızda da farklı markalara ait paslanmaz çelik braketlerin, aynı yapay ortamda ve aynı solüsyonlarla test edildiğinde bile farklı salınım profili sergilemesi, üretim teknolojisinin ve yüzey kaplamalarının etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Pazzini ve arkadaşları, ortodontik tedavi gören alerjik bireylerde nikel iyonlarının periodontal sağlığı olumsuz etkilediğini göstermiştir (Pazzini ve ark., 2009). Bizim çalışmamızda da özellikle %45 KP ve %40 HP gruplarında bazı markalarda nikel salınımının 30 µg/L'yi aştığı göz önünde bulundurulduğunda, beyazlatma uygulamalarının metal iyon salınımını artırarak klinik olarak potansiyel risk oluşturabileceği söylenebilir.

Huang'ın yaptığı çalışmada ise, tellerin yüzey pürüzlülüğü ile korozyon arasında doğrudan bir ilişki bulunamamış; üretim sürecinde oluşan yüzey gerilimlerinin daha etkili olabileceği vurgulanmıştır (Huang, 2005). Bizim çalışmamızda da her üç markanın farklı solüsyonlarda element bazında değişen salınımlar göstermesi, bu bulguyla uyumludur. Özellikle kontrol grubu olan YT ortamında bile, markalar arası farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu durum, beyazlatma ajanlarının iyon salınımına etkisini değerlendirirken, temel materyal karakteristiğinin mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

Çalışmamızda, paslanmaz çelik braketlerden salınan Ni, Cr ve Cu iyon düzeylerinin hem materyal markasına hem de maruz kaldıkları solüsyona göre değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Özellikle %45 KP ve %40 HP gruplarında, YT kontrol grubuna kıyasla bazı iyonların salınımında anlamlı artış gözlemlenmiştir. Bu durum, oksidatif özellikleri güçlü olan beyazlatma ajanlarının metal yüzeyinde korozyonu teşvik etmesine bağlanabilir. Staffolani ve arkadaşlarının (Staffolani ve ark., 1999) gerçekleştirdiği in vitro çalışmada da benzer şekilde, daha düşük pH seviyelerinde (özellikle pH 3.5) Ni, Cr ve Cu salınımlarının anlamlı derecede arttığı; pH 6.5'e yaklaştıkça ise salınımın azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada Cu ve Cr iyonlarının salınımının 1. günde maksimuma ulaştığı ve ilerleyen günlerde azaldığı, ancak nikelin 14. günde artış gösterdiği belirtilmiştir.

Bizim çalışmamızda da AO Mini Master braketlerde KP ve HP solüsyonları ile temas sonrası Ni, Cr ve Cu salınımlarının yapay tükürüğe kıyasla belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle Cu için 47,22 µg/L'ye ulaşan ortanca değer, beyazlatıcı ajanların Cu içeren alaşım bileşenleriyle daha agresif etkileşime girebileceğini düşündürmektedir. Staffolani ve arkadaşlarının çalışmasında da organik asitlere maruziyetin Cu salınımını anlamlı şekilde azalttığı, ancak Ni salınımını yaklaşık 2,5 kat artırdığı belirtilmiştir. Bu bulgular, farklı kimyasal ajanların metaller üzerindeki korozyon etkilerinin sadece pH'a değil, aynı zamanda çözeltinin içeriğine ve oksidatif potansiyeline bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Çalışmamızda, pH değeri fizyolojik düzeyde olan yapay tükürük ortamında genel olarak daha düşük iyon salınımı gözlenmesi, önceki literatürle de uyumlu şekilde daha az korozyon riski taşıyan bir ortam olduğunu desteklemektedir. Ancak KP ve HP gibi oksitleyici ajanların, daha yüksek pH değerine rağmen iyon salınımını artırabilmesi, bu maddelerin redoks potansiyeli yüksek bileşenler içermesiyle açıklanabilir. Dolayısıyla, braket materyallerinin seçimi kadar, uygulanacak ajanların kimyasal özellikleri ve süresinin de biyouyumluluk açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Benzer şekilde, Huang ve arkadaşlarının (Huang ve ark., 2001) yeni ve geri dönüştürülmüş braketlerden iyon salınımını değerlendirdikleri bir çalışmalarında, geri dönüştürülmüş braketlerden Ni, Cr ve Fe iyonlarının anlamlı şekilde daha yüksek oranlarda salındığı rapor edilmiştir. Çalışmada, pH 4 ve YT çözeltisi gibi daha asidik ve biyolojik ortam benzeri koşullarda Ni, Cr ve Fe salınımının, pH 7 ve pH 10'a kıyasla belirgin derecede arttığı gösterilmiştir. Ayrıca, 12 haftalık bekletme süresi, 1 saatlik kısa süreli maruziyete göre anlamlı şekilde daha fazla iyon salınımına neden olmuştur. Bu bulgular, salınım miktarlarının hem pH düşüklüğü hem de süreyle birlikte arttığını ortaya koymaktadır.

Bizim çalışmamızda da benzer şekilde, özellikle beyazlatma ajanlarının uygulandığı gruplarda, YT grubuna kıyasla bazı elementlerin (örneğin nikel) salınımında artış gözlemlenmiştir. Bu durum, sadece ortamın pH'ı değil, aynı zamanda ajanların kimyasal özelliklerinin (örneğin HP'nin oksitleyici etkisi) metal yüzeyinde korozyona yol açarak iyon salınımını artırabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bizim çalışmamızda geri dönüştürülmüş değil, doğrudan yeni paslanmaz çelik braketler kullanılmıştır. Bu açıdan, geri dönüşümün yüzey

morfolojisinde veya pasif oksit tabakasında oluşturabileceği bozulmaların iyon salınımı üzerindeki etkileri bu çalışmadan farklılık gösterebilir.

Asidik ortamlar ve kimyasal ajanlara maruziyet metal iyon salınımını yapay tükürüğe kıyasla daha fazla etkileyebilmektedir. Bu nedenle, ortodontik tedavi sırasında kullanılan kimyasalların biyouyumlu olup olmadığı kadar, pH değişimlerine ve uzun süreli maruziyete karşı dirençli materyallerin tercih edilmesi klinik açıdan büyük önem taşımaktadır.

Dananei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, farklı ağız gargaraları (Oral B, Persica, klorheksidin ve deiyonize su) içerisine yerleştirilen ortodontik braketlerden salınan metal iyon miktarları incelenmiştir. Çalışmada özellikle Ni, Cr ve Mn gibi iyonların deiyonize suda, diğer tüm gargaralardan anlamlı derecede daha fazla salındığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, literatürde sıklıkla vurgulanan “asidik ortamda iyon salınımı artar” görüşüyle çelişmektedir. Araştırmacılar, bu durumu deiyonize suyun çok düşük iyonik güce sahip olması nedeniyle, braket yüzeyinden sıvı ortama iyon geçişinin artması şeklinde açıklamıştır. Aynı zamanda Ni salınımı, klorheksidin ve deiyonize suda anlamlı şekilde daha yüksek bulunmuş, bakır ise tüm gruplarda en düşük salınım gösteren element olmuştur (Danaei ve ark., 2011).

Benzer şekilde, bu çalışmadaki bulgular bizim çalışmamızda elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Özellikle kontrol grubumuz olan YT’de iyon salınımı, beyazlatıcı ajanlara maruz bırakılan gruplara kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu durum, Tükürüğün içerdiği tamponlama sistemi ve iyonik bileşimi nedeniyle metal yüzey ile ortam arasındaki çözünme dengesini daha stabilize etmesine bağlanabilir (Humphrey ve ark., 2001). Öte yandan, beyazlatma solüsyonlarının oksidatif yapısı, yüzeydeki koruyucu oksit tabakalarının bozulmasına neden olarak iyon salınımını artırmış olabilir. Bu yönüyle değerlendirildiğinde, sadece pH değil, aynı zamanda solüsyonun oksidatif kapasitesi ve iyonik gücü gibi diğer kimyasal özelliklerin de iyon salınımı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Matos de Souza ve arkadaşlarının yaptığı in vivo çalışmada, sabit ortodontik apareylerin yerleştirilmesini takiben bireylerin tükürüğünde Ni ve Cr iyonlarında belirgin bir artış saptanmıştır (Matos de Souza & Macedo de Menezes, 2008). Benzer şekilde, çalışmamızda da kontrol grubu olarak YT ortamında bekletilen paslanmaz çelik braketlerden özellikle 3M Solventum ve AO Mini Master braketlerde ait örneklerde Ni ve Cr salınımının anlamlı düzeylere ulaştığı görülmüştür. Bu durum, yalnızca beyazlatma ajanlarının değil, ortodontik

materyalin kendi yapısal özelliklerinin de iyon salınımında etkili olduğunu göstermektedir.

Beyazlatma ajanlarının metal iyon salınımı üzerindeki etkisinin değerlendirildiği literatürde, farklı çalışmalar zaman zaman çelişkili bulgular ortaya koymaktadır. Örneğin, Al-Salehi'nin (Al-Salehi, 2009) 2009 yılında yaptığı bir çalışmada, su ile karşılaştırıldığında farklı HP konsantrasyonlarının amalgam materyallerden daha fazla metal iyonu salımına yol açtığı bildirilmiştir. Özellikle %3,6 ve %6 HP içeren gruplarda, temas süresi uzadıkça iyon çözünmesinde anlamlı artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, HP'nin güçlü oksidatif kapasitesine bağlı olarak materyal yüzeyinde koruyucu oksit tabakalarını bozabileceğini ve bu sayede iyon salınımını kolaylaştırabileceğini göstermektedir.

Ancak aynı araştırmacının yürüttüğü bir diğer çalışmada (Al-Salehi ve ark., 2006) , %10 KP içeren beyazlatıcı jelin amalgam materyallerde Hg, Cu, Ag ve Sn iyonları açısından anlamlı bir salınım artışına yol açmadığı ve kontrol (plasebo) jeliyle karşılaştırıldığında istatistiksel olarak fark bulunmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca, SEM görüntüleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde de gruplar arasında anlamlı bir değişim saptanmamıştır. Araştırmacılar bu farkı, KP'nin HP'ye kıyasla daha düşük reaktifliğe sahip olması ve salınımın yavaş gerçekleşmesiyle açıklamıştır.

Bu açıdan değerlendirildiğinde, bizim çalışmamızda elde edilen bulgular Al-Salehi'nin HP uygulamalarında gözlemlediği iyon salınım artışı ile daha fazla uyumluluk göstermektedir. Özellikle %45 KP ve %40 HP ajanlarına maruz bırakılan paslanmaz çelik braket gruplarında, kontrol grubuna göre daha yüksek düzeyde Ni, Cr ve Cu iyonları salınımı kaydedilmiştir. Bu artış, beyazlatma ajanlarının materyal yüzeyinde oluşturduğu oksidatif stresin, koruyucu oksit tabakasını bozarak iyon çözünmesini kolaylaştırabileceği hipotezini desteklemektedir. Ayrıca, farklı markalara ait braketlerin benzer koşullarda bile değişen salınım profilleri göstermesi, materyal bileşiminin ve yüzey özelliklerinin bu süreçte belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Sardarian ve arkadaşlarının yaptığı beyazlatma ajanlarının ortodontik braketlerden iyon salınımı üzerindeki etkisini değerlendiren örnek çalışmada, hem ofis tipi (%40 HP) hem de ev tipi (%20 KP) uygulamaların kontrol grubuna kıyasla daha fazla iyon salınımına yol açtığı ve bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu bildirilmiştir (Sardarian ve ark., 2023). Ofis tipi beyazlatma uygulamasının en fazla

iyon salınımına neden olması, HP'nin yüksek oksidatif kapasitesine bağılı olarak yüzey pasifasyon tabakasında meydana gelen çözünmeyi açıklayabilir. Sardarian ve arkadaşlarının gerçekleştirdiğı bu çalışmada, Cr, Ni, Fe ve Mg iyonlarının sırasıyla kontrol <ev tipi <ofis tipi beyazlatma sıralamasında salındığı bildirilmiş; bu durum oksitleyici ajan yoğunluğu arttıkça iyon çözünmesinin de arttığını ortaya koymuştur. Özellikle Cr ve Ni gibi biyolojik açıdan reaktif elementlerin salınımındaki artış, ortodontik tedavi sırasında beyazlatma yapılmasının potansiyel biyoyumluluk risklerini gündeme getirmektedir.

Bizim çalışmamızda da benzer şekilde, %40 HP uygulanan gruplarda YT grubuna kıyasla başta Ni ve Cr olmak üzere çeşitli metal iyonlarının daha fazla salındığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, oksidatif stresin koruyucu oksit tabakalarının bütünlüğünü bozarak iyon çözünmesini artırabileceğini desteklemektedir.

İlginç olarak, Sardarian ve arkadaşlarının çalışmasında Cu iyon salınımı, ev tipi beyazlatma uygulamasında kontrol grubundan daha düşük bulunmuştur. Bu bulgu, farklı elementlerin oksidatif stres karşısındaki davranışlarının birbirinden farklı olduğunu ve malzeme-matriks-reaktif ajan etkileşimlerinin iyon spesifik şekilde incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Sardarian ve arkadaşlarının bulguları bizim elde ettiğimiz verilerle örtüşmekte ve özellikle HP içeren ofis tipi beyazlatma uygulamalarının, ortodontik materyallerin iyon çözünürlüğü üzerinde daha güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Klinik uygulamalarda beyazlatma işlemlerinin güvenliği değerlendirirken, kullanılan ajan tipi ve süresi kadar, materyal yapısı ve iyon salınım potansiyeli de dikkate alınmalıdır.

Ortodontik materyallerin biyoyumluluğu ile ilgili literatürde çelişkili sonuçlar bildiren birçok çalışma bulunmaktadır. Ortiz ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, paslanmaz çelik, Ni içermeyen ve titanyum esaslı braketlerin 30 gün boyunca minimum essential medium (MEM) içinde bekletilmesiyle elde edilen bekletme solüsyonları üzerinde yapılan analizlerde, paslanmaz çelik grubunda yüksek düzeyde iyon salınımı (özellikle Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Fe, Cu, Zn) gözlenmiş ve bu grubun insan fibroblast hücre canlılığını neredeyse %0'a kadar düşürdüğü, aynı zamanda DNA hasarına neden olduğu bildirilmiştir. Buna karşılık, Ti esaslı braketlerin daha düşük iyon salınımı gösterdiği, hücre canlılığını koruduğu ve DNA hasarına yol açmadığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, özellikle paslanmaz

elik materyallerin uzun süreli temaslarında biyolojik risk potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir (Ortiz ve ark., 2011).

Buna karşılık, Eliades ve arkadaşlarının (Eliades ve ark., 2004) gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada, iki farklı paslanmaz elik braket seti ve NiTi teller 0.9% salin çözeltisinde 30 gün bekletilmiş ve iyon salınımı ICP-AES yöntemiyle değerlendirilmiştir. NiTi tellerden anlamlı bir iyon salınımı gözlenmemiş, paslanmaz elik braketlerden ise yalnızca ölçülebilir düzeyde nikel ve eser miktarda krom salınımı saptanmıştır. Bu alışma, aynı zamanda bekletme ortamlarının sitotoksik etkilerini de değerlendirmiş ve her iki materyalden elde edilen ortamların fibroblast hücre canlılığı ve DNA sentezi üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermiştir.

Bu iki çalışmanın farklı sonuçlar vermesinin temel nedenleri arasında, kullanılan bekletme ortamlarının farklılığı ne çıkmaktadır. Gomis ve ark. biyolojik olarak daha aktif bir ortam olan MEM kullanırken, Eliades ve ark. daha nötr ve iyon dengesini stabilize eden salin çözeltisini tercih etmiştir. Bu fark, iyon salınım düzeylerini ve biyolojik etkilerini doğrudan etkilemektedir.

Çalışmamızda da özellikle beyazlatıcı ajanlara maruz kalan gruplarda bazı paslanmaz elik braketlerden Ni, Cr ve Cu iyonlarının arttığı saptanmıştır. Ancak bu artışların, hücre düzeyinde toksik etki oluşturup oluşturmayacağı, yalnızca iyon miktarı üzerinden değerlendirilmesi yanlış yorumlamaya sebep olabilir. Gomis ve Eliades'in (Eliades ve ark., 2004; Gomes ve ark., 2017) alışmaları birlikte değerlendirildiğinde, materyal bileşiminin yanı sıra çevresel koşulların ve biyolojik ortam özelliklerinin, ortodontik materyallerin biyouyumluluğunu belirlemede kritik rol oynadığı söylenebilir. Bu nedenle, ortodontik tedavi sırasında beyazlatıcı ajanlara maruz kalan braketlerin biyouyumluluğu değerlendirildiğinde hem iyon salınımı hem de hücresel düzeyde potansiyel etkiler çok yönlü şekilde ele alınmalıdır.

Bu çalışmada yalnızca 28. gün verileri üzerinden değerlendirme yapılmış olup, 1. gün verileri analiz edilmemiştir. Ancak Koçak'ın (Koçak, 2017) hem T0 hem T1 zaman noktalarını içeren tez çalışmasında, maksimum iyon salınımının 1. günde gerçekleştiği, 42. gün değerlerinin ise buna kıyasla anlamlı derecede daha düşük olduğu bildirilmiştir. Bu bulgu, çalışmamızda sadece T1 zaman noktasına ait ölçümlerin değerlendirilmiş olmasının, salınımın en yüksek olduğu dönemi göz ardı etmiş olabileceğine işaret etmektedir. Koçak'ın çalışmasında iyon salınımı; farklı

üreticilere ait paslanmaz çelik braketler ve ark telleri üzerinde, modifiye Fusayama yapay tükürüğü kullanılarak üç farklı pH ortamında (4, 5.5 ve 6.7) değerlendirilmiş, sonuçlar zaman (T0-T1) ve pH etkisi açısından ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Buna göre, pH azaldıkça iyon salınımı genel olarak artmış ve bu etki özellikle Co, Ni ve Sr gibi elementlerde belirginleşmiştir. Çalışmamızda özellikle Ni, Cr, Cu ve Sr iyonları yönünden materyal kaynaklı anlamlı farklılıklar gözlenmiş olup, D Discovery Smart braketleri bu metaller için genellikle en düşük salınım değerlerini göstermiştir. Ayrıca Koçak'ın çalışmasında Sr elementinin yüksek salınım potansiyeli dikkat çekmiş olup, çalışmamızda da Sr iyonlarının salındığı ve materyaller arası anlamlı fark oluşturduğu gösterilmiştir. Sr'un yüksek salınım eğilimi ve biyolojik etkileri, ortodontik materyal seçimi açısından dikkat edilmesi gereken bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Diğer yandan, söz konusu tezde 21 farklı element değerlendirilmişken, çalışmamızda iyon salınımı biyolojik ve klinik olarak daha kritik kabul edilen Ni, Cr, Co, Cu, Zn, Sr, Ti, Pb ve Cd gibi 9 element ile sınırlandırılmıştır. Ancak bu sınırlama, iyonların insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri göz önüne alınarak klinik açıdan en anlamlı elementlerin seçilmesine dayanmaktadır. Yine de bu bağlamda gelecekte yapılacak çalışmalarda daha geniş element profili ile değerlendirme yapılması önerilebilir.

Sonuç olarak, çalışmamızda yalnızca tek zaman noktasında ölçüm yapılmış olması ve kullanılan ajanların asiditesi dışında farklı pH koşullarının ayrıca kontrol edilmemiş olması önemli bir sınırlılık olarak değerlendirilebilir. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, iyon salınım davranışının hem zaman hem pH hem de kimyasal ajan etkisiyle birlikte değerlendirilmesinin daha bütüncül bir bakış sunduğu söylenebilir. Bununla birlikte, çalışmamız özellikle klinikte sıklıkla kullanılan beyazlatma ajanlarının braket materyalleri üzerindeki iyon salınım profiline dair özgün veriler sunmakta ve hasta güvenliği açısından önemli sonuçlar ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, Haddad ve arkadaşları (Haddad ve ark., 2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, farklı üreticilere ait yedi braket grubundan salınan Ni ve Cr miktarları, simüle edilmiş oral ortamlarda değerlendirilmiştir. Çalışmada, uluslararası geçerliliği bulunan ISO 10271:2001 standardı doğrultusunda test yöntemi uygulanmıştır. Bu standart, dental metalik materyallerin korozyon davranışlarını değerlendirmek üzere geliştirilmiş olup, yapay ortamlarda metal

iyonlarının salınımını test etmeye yönelik metodolojik kuralları belirlemektedir. Haddad ve ark., 28 gün boyunca braketleri sentetik tükürük ve yapay plak sıvısı ortamında inkübe etmiş; solüsyonları haftalık olarak yenileyerek spektrometrik analizlerle iyon salınımını değerlendirmiştir. Bulgular, braketlerin üreticiye bağlı olarak farklı korozyon davranışı sergilediğini ve düşük Ni içerikli olarak tanımlanan Co-Cr alaşımlı materyallerin dahi yüksek Ni salınımı yapabileceğini ortaya koymuştur. Haddad ve ark.'nın çalışması, yalnızca alaşım içeriğinin değil, aynı zamanda üretim tekniği, yüzey işlemleri ve pasivasyon özelliklerinin de korozyon davranışını etkileyebileceğini göstermektedir. Nitekim bizim çalışmamızda da D markalı Discovery Smart braketlerin birçok elementte anlamlı derecede daha düşük iyon salınımı göstermesi, üretici kaynaklı bu tür faktörlerin önemini desteklemektedir. Bu nedenle, ortodontik materyal seçimi yapılırken yalnızca alaşım bileşimi değil, üreticiye özgü teknik farklılıklar da dikkate alınmalı; iyon salınımına bağlı biyolojik etkilerin daha net anlaşılabilmesi için ileri düzey in-vivo çalışmalarla desteklenmelidir.

Çalışmamızda %40 HP ve %45 KP solüsyonlarıyla muamele edilen paslanmaz çelik braketlerden yapay tükürüğe salınan iyon miktarları değerlendirilmiş ve özellikle Ni ve Ti salınımlarında anlamlı farklılıklar saptanmıştır. Bu bulgular, klinik ortamda sabit ortodontik apareylerden salınan iyonların biyolojik sıvılarda tespit edildiğini gösteren in vivo çalışmalarla paralellik göstermektedir. Örneğin, Ni ve Ti iyonlarının tükürük ve idrarda belirli aralıklarla ölçüldüğü bir klinik çalışmada (Velasco-Ibanez ve ark., 2020), tedavinin 3. ve 6. ayları arasında nikel ve titanyum konsantrasyonlarının anlamlı olarak arttığı bildirilmiştir. Bu durum, sabit ortodontik materyallerin uzun süreli kullanımında metal iyonlarının biyolojik sıvılarda birikme potansiyeline işaret etmektedir. Ancak bizim çalışmamızda iyon salınımının 28 gün sonunda ölçülmüş olması, in vivo koşullarda gözlenen kronik ve kümülatif salınımın aksine daha kısa süreli bir değerlendirmeyi yansıtmaktadır. Bununla birlikte, özellikle KP grubunda daha yüksek salınım gözlenmiş olması, beyazlatıcı ajanların korozyonu artırıcı etkisini destekler niteliktedir ve klinik açıdan bu ajanların ortodontik tedavi sürecinde kontrollü kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

Literatürde Co-Cr dental alaşımlarının biyoyumluluğu da sıkça tartışılmıştır. Avrupa'daki düzenleyici değişiklikler (Regulation (EU) 2017/745 ve CLP Regulation (EC) 1972/2008, Annex VI) ile birlikte Co-Cr alaşımların olası

toksik etkileri daha fazla önem kazanmıştır. Yapılan sistematik bir derlemede (Grosogeat ve ark., 2022), 1995–2022 yılları arasında yayımlanan 836 çalışma değerlendirilmiş ve PRISMA metodolojisine göre 21 çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Sonuçlara göre, in vitro çalışmalarda Co-Cr alaşımlarının özellikle Ni içeren alaşımlara kıyasla daha iyi biyouyumluluk gösterdiği ortaya konmuştur. İn vivo çalışmalarda ise Co-Cr materyallerinin nadiren duyarlılık, irritasyon veya tip IV aşırı duyarlılık reaksiyonlarına neden olabileceği, bu reaksiyonların da genellikle Co veya Cr alerjisi bulunan bireylerde gözlemlendiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, titanyum bazlı materyallerin biyouyumluluk açısından daha üstün sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, çalışmamızda elde edilen Co ve Cr salınımı verilerinin klinik açıdan değerlendirilmesinde önemlidir.

Çalışmamızda Ti iyon salınımı, özellikle 3M Solventum ve AO Mini Master braketlerde HP ve KP gruplarında gözlenmiş, D Discovery Smart Braketlerde ise yok denecek kadar düşük bulunmuştur. Literatürde titanyum genellikle biyouyumlu bir materyal olarak kabul edilmekle birlikte, tamamen inert olmadığı da ortaya konmuştur. Özellikle dental implantlarla ilgili çalışmalarda (Kheder ve ark., 2021), implant yüzeylerinden ayrılan titanyum partiküllerinin peri-implant dokularda birikebildiği ve bağışıklık sistemini aktive ederek proinflamatuvar sitokinlerin (TNF- α , IL-1 β , IL-6 vb.) salınımına yol açabildiği gösterilmiştir. Peri-implantitis bulunan bölgelerde partikül konsantrasyonlarının sağlıklı implant bölgelerine kıyasla daha yüksek bulunması, titanyumun biyolojik açıdan risk oluşturabileceğine işaret etmektedir. Her ne kadar implant ortamı ortodontik braketlerden farklı biyomekanik ve biyolojik koşullar içerse de bu veriler titanyumun uzun dönem klinik kullanımda tamamen pasif kabul edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, çalışmamızda elde edilen düşük düzeydeki Ti salınımı klinik açıdan güvenli görünmekle birlikte, özellikle duyarlılığı olan bireylerde potansiyel risklerin göz ardı edilmemesi gerektiği düşünülmektedir. İmplantlarla yapılan bir in vitro çalışmada (Penarrieta-Juanito ve ark., 2019), dental implant-abutment sistemleri %35 HP içerisinde bekletmeye tabi tutulduğunda, SEM analizlerinde lokalize korozyon izlenmemiş olmasına rağmen profilometri ile yüzey pürüzlülüğünde artış saptanmış ve ICP-MS ile Ti, Al ve V iyonlarının salındığı gösterilmiştir. Bu bulgular, HP'nin implant ve abutment yüzeylerinde degradasyonu hızlandırarak biyolojik açıdan risk oluşturabilecek metal iyonlarının salınımına yol açabileceğini ortaya koymaktadır. Bizim

çalışmamızda da HP grubunda Ti salınımının gözlenmesi, bu verilerle uyumludur ve HP temelli beyazlatıcı ajanların ortodontik braketler gibi titanyum içeren alaşımlar üzerinde tamamen inert olmadığına işaret etmektedir.

Çalışmamızda farklı markalara ait braketlerde Ni iyon salınımı gözlenmiş, özellikle 3M Solventum ve AO Mini Master gruplarında daha yüksek değerler elde edilirken, D Discovery Smart braketlerde salınımın oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, braketlerin üretim alaşımı ve yüzey özelliklerine bağlı farklılıkların iyon salınımında belirleyici olduğunu göstermektedir. Literatürde de benzer bulgular mevcuttur. Farklı materyallerden üretilmiş dokuz braket sisteminin korozyon davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Luft ve ark., 2009), tüm sistemlerde elektrokimyasal testler sonrasında korozyon izleri gözlenmiş, ancak statik bekletme testlerinde yalnızca küçük korozyon defektleri rapor edilmiştir. Ayrıca, ölçülen Ni iyon salınımı kritik sınırların oldukça altında bulunmuş ve günlük diyetle alınan nikel miktarından çok düşük olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, çalışmamızda tespit edilen Ni salınımlarının klinik açıdan biyouyumlu düzeylerde olduğunu ve ortodontik tedavide güvenle kullanılabileceğini desteklemektedir. Bununla birlikte, duyarlılığı olan bireylerde düşük seviyedeki Ni salınımının dahi klinik semptomlara yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Literatürde de braket tipine ve işlem geçmişine bağlı olarak benzer farklılıklar bildirilmiştir. 2010 yılında yayımlanan bir in vitro çalışmada (Sfondrini ve ark., 2010), geri dönüştürülmüş paslanmaz çelik braketlerin en yüksek nikel salınımını gösterdiği (74,02 µg/g), yeni paslanmaz çelik braketlerin daha düşük salınım yaptığı (7,14 µg/g), Ni içermeyen braketlerin ise en düşük salınım değerlerine sahip olduğu (0,03 µg/g) rapor edilmiştir. Ayrıca, en yüksek Ni salınımı asidik koşullarda (pH 4,2) gözlenmiş, nötre yakın pH değerlerinde daha düşük bulunmuştur. Bu bulgular, çalışmamızdaki sonuçlarla uyumlu olup, braket materyali ve çevresel koşulların nikel salınımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, ölçülen değerlerin kritik biyolojik sınırların altında olması, klinik açıdan biyouyumluluğun korunduğunu düşündürmektedir.

Çalışmamızda elde edilen sonuçlar, paslanmaz çelik braketlerin farklı beyazlatma ajanları ile etkileşiminde belirli düzeylerde Ni ve Cr salınımı gerçekleştiğini göstermektedir. Bu bulgu, paslanmaz çeliğin koruyucu oksit tabakasının beyazlatıcı ajanların oksidan özellikleri karşısında tam anlamıyla stabil kalmadığını düşündürmektedir. Literatürde de paslanmaz çeliğin ve Ni içeren

alaşımların çukurlaşma (pitting) korozyonuna karşı duyarlı olduğu rapor edilmiştir (Rondelli & Vicentini, 1999). Farklı üreticilere ait çeşitli şekil ve boyutlardaki Ni–Ti ortodontik tellerin korozyon performanslarının incelendiği bir çalışmada, yapay tükürükte yapılan potansiyodinamik testlerde Ni–Ti tellerin kobalt bazlı alaşımlara benzer düzeyde pitting direncine sahip olduğu, buna karşılık paslanmaz çelik tellerin düşük pitting potansiyeli sergilediği bildirilmiştir. İzotonik salin ortamında yapılan testler ise Ni–Ti ve paslanmaz çelik tellerin potansiyel olarak pitting korozyonuna duyarlı olduğunu, yalnızca kobalt bazlı alaşımın bağışıklık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu veriler, çalışmamızda gözlenen Ni ve Cr salınımıyla birlikte değerlendirildiğinde, paslanmaz çelik braketlerin özellikle oksidan ortamlarda pitting korozyon riski taşıdığını ve bu riskin iyon salınımını artırarak biyouyumluluk açısından önem taşıyabileceğini desteklemektedir.

Çalışmamızda elde edilen bulgular, paslanmaz çelik braketlerin farklı beyazlatma ajanları ile etkileşimi sonrasında belirli düzeylerde Ni, Cr, Co ve Ti iyonlarının yapay tükürüğe salındığını göstermektedir. Bu sonuçlar, dental alaşımlardan iyon salınımının yalnızca materyalin içeriğine değil, aynı zamanda çevresel koşullara ve kimyasal etkileşimlere de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde de bu bulgularla uyumlu sonuçlar mevcuttur. Dental alaşımlardan korozyon ürünlerinin salınımının incelendiği geniş kapsamlı bir derlemede (Brune, 1986), yüksek Ni içeriğine sahip baz metal alaşımlardan in vitro koşullarda gıda ve içeceklerden alınan miktarla kıyaslanabilir düzeyde Ni salınımı olduğu bildirilmiştir. Buna karşılık, Co esaslı alaşımlarda Ni salınımının önemsiz olduğu, diğer elementlerin ise gıda kaynaklı günlük alımların oldukça altında kaldığı vurgulanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada Hg, Cd ve Cu gibi elementlerin özellikle amalgamlardan anlamlı düzeyde salındığı, mekanik kuvvetlerin (ör. çiğneme) salınımı artırdığı ve döngüsel bir salınım paternine yol açtığı ifade edilmiştir. Bu veriler, çalışmamızda elde edilen Ni ve Cr salınımının beyazlatma ajanlarının etkisiyle artmasının biyouyumluluk açısından dikkate alınması gereken bir durum olduğunu ve iyon salınım düzeylerinin yalnızca materyal özellikleriyle değil, aynı zamanda uygulanan kimyasal ajanlarla da ilişkili olduğunu desteklemektedir.

2005 yılında Baydaş ve arkadaşlarının (Baydaş & Yavuz, 2005) yaptıkları bir çalışmada farklı pH düzeyleri ve bekletme sürelerinin yanı sıra dört farklı ark teli ile bunlara bağlı bant ve braketlerden yapay tükürük ortamına salınan Ni, Cr ve Co iyon miktarları değerlendirilmiştir. Bulgular, iyon salınımı üzerinde özellikle

pH ve süre faktörlerinin belirgin etkili olduğunu, fakat farklı ark telleri arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılık bulunmadığını ortaya koymuştur. Çalışmada iyon salınımı en yüksek pH 4 ortamında, en düşük ise nötr (pH 7) yapay tükürükte saptanmıştır. Bu sonuç, düşük pH değerlerinde artan korozyif aktivitenin metal iyonlarının serbestleşmesini hızlandığını göstermektedir. Benzer şekilde Huang (2005) ve Danaei ve ark. (2011), düşük pH koşullarında metal iyon salınımının anlamlı şekilde arttığını rapor etmişlerdir. Bu durum, ağız ortamında asidik gıdalar veya düşük pH'lı içecekler tüketildiğinde ortodontik materyallerin biyoyumluluğunun daha fazla risk altında olabileceğini düşündürmektedir. Zaman faktörü incelendiğinde, iyon salınımı ilk iki ayda belirgin olmakla birlikte üçüncü ayda plato eğilimine girmiştir. Bu bulgu, korozyif süreçlerin başlangıçta daha aktif olduğunu, zamanla yüzeyde pasif tabaka oluşumuna bağlı olarak iyon geçişinin stabilize olduğunu düşündürmektedir. Benzer bir yatay seyir Matos de Souza & Macedo de Menezes (2008) tarafından da rapor edilmiştir. Bu durum klinik açıdan, tedavinin erken dönemlerinde hastaların daha yüksek iyon maruziyetine sahip olabileceğini, ilerleyen süreçte ise daha stabil bir denge oluştuğunu göstermektedir.

Çoklu karşılaştırma analizine göre YT'ye en fazla geçen element Ni, en az geçen ise Cr olmuştur. Ni ve Co arasında anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir (Baydaş & Yavuz, 2005). Bu bulgu, literatürdeki pek çok çalışmayla uyumludur. Nikel, paslanmaz çelik ve Ni-Ti alaşımların en reaktif bileşenlerinden biri olup biyoyumluluk açısından en çok endişe yaratan elementtir (Faccioni ve ark., 2003; Staffolani ve ark., 1999). Çalışmada Cr salınımının düşük bulunması ise, krom oksit tabakasının koruyucu rolünü desteklemektedir.

Çalışmada dört farklı ark teli arasında iyon salınımı açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmamıştır. Bununla birlikte, en düşük salınım NiTi ve paslanmaz çelik tellerden, en yüksek salınım ise çok sarımlı paslanmaz çelik tel ve TMA telden elde edilmiştir (Baydaş & Yavuz, 2005). Bu sonuç, materyal kompozisyonunun yanı sıra telin yapısal özelliklerinin, örneğin çok sarımlı tellerde artmış yüzey alanının, korozyon davranışını etkileyebileceğini göstermektedir. Kobayashi ve ark. (2007) da farklı tel yapılarının korozyona direnç üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir.

Bizim çalışmamızda, özellikle Ni salınımının bazı gruplarda diğer iyonlara kıyasla daha yüksek düzeyde olduğu saptanmıştır. Her iki çalışmanın sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, iyon salınımının materyalin kimyasal yapısı ve

çevresel koşullara bağlı olduğu, özellikle Ni elementinin en duyarlı metal bileşen olarak öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca her iki çalışmada da Cr salınımının görece düşük bulunması, krom oksit tabakasının koruyucu etkisini bir kez daha doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, ortodontik tedavi gören hastalarda biyouyumluluk açısından özellikle Ni iyonuna dikkat edilmesi gerektiğini ve asidik gıdalar ile beyazlatıcı ajanların klinik süreçte materyal davranışını etkileyebileceğini göstermektedir.

2009 yılında Kuhta ve arkadaşlarının (Kuhta ve ark., 2009) yaptıkları bir çalışmada, farklı ark telleriyle oluşturulmuş simüle sabit ortodontik apareylerden yapay tükürük ortamına salınan Ti, Ni, Cr, Fe, Cu ve Zn iyonları incelenmiş ve iyon salınımı üzerinde pH, bekletme süresi ve tel tipinin etkisi değerlendirilmiştir. Bulgular, en yüksek iyon salınımının deneyin ilk günlerinde gerçekleştiğini ve özellikle düşük pH (3.5) ortamında nötr pH'a kıyasla birkaç kat daha fazla iyon salındığını ortaya koymuştur. En fazla salınım Cu'dan, en düşük salınım ise Ti'den elde edilmiştir. Paslanmaz çelik tellerden erken dönemde (1. ve 7. günlerde) Cr, Fe, Ni, Cu ve Zn salınımının daha yüksek olduğu görülmüş, fakat pH 3.5 koşullarında teller arasındaki farklılık kaybolmuştur. Genel olarak zaman ilerledikçe iyon salınımında azalma eğilimi gözlenmiş ve çoğu elementte 7. günden sonra belirgin düşüş kaydedilmiştir.

Çalışmamızla birlikte değerlendirildiğinde, iyon salınımının en yoğun olduğu dönemlerin erken bekletme zamanlarında ortaya çıktığı ve düşük pH koşullarında bu etkinin belirginleştiği anlaşılmaktadır. Literatürde bildirilen düşük pH'ın korozyon aktiviteyi artırarak iyon salınımını hızlandırdığı bulguları (Danaei ve ark., 2011; Huang, 2005) hem söz konusu çalışmada hem de bizim çalışmamızın sonuçlarıyla uyumludur. Element bazında değerlendirildiğinde, her iki çalışmada da Ni salınımı en dikkat çekici bulgu olarak öne çıkmıştır. Ni'nin yüksek reaktivitesi ve biyouyumluluk açısından taşıdığı risk, literatürde de vurgulanmıştır (Faccioni ve ark., 2003; Staffolani ve ark., 1999). Çalışmamızda Cr salınımının düşük bulunması, bu çalışmada da görüldüğü üzere krom oksit tabakasının koruyucu etkisini doğrulamaktadır. Cu salınımının diğer iyonlara kıyasla yüksek bulunması ise lehim bölgelerinin korozyona duyarlılığını işaret etmektedir. Zn salınımı ise hem bu çalışmada hem de bizim çalışmamızda Cu ve Ni'ye kıyasla daha düşük düzeylerde gerçekleşmiştir. Özellikle pH 6.75 ortamında erken dönemde belirgin olan Zn salınımının asidik koşullarda kaybolması, Zn'nin yapısal

bileşimi ve koruyucu oksit tabakasıyla ilişkilendirilebilir. Çalışmamda Zn iyonlarının YT'ye geçişi düşük seviyelerde kalmış ve istatistiksel olarak anlamlı bir artış göstermemiştir. Literatürde de Zn'nin iyon salınımı bakımından Ni ve Cu'ya kıyasla ikincil öneme sahip olduğu bildirilmiş olup, bu sonuçlar genel olarak biyoyumluluk açısından olumlu kabul edilebilir.

Sonuç olarak, farklı pH değerleri, bekletme süreleri ve beyazlatıcı ajanlar iyon salınımı üzerinde etkili olmakla birlikte, iyonların miktarı ve dağılımı materyalin yapısal özellikleri ve maruz kalınan ortam koşullarıyla ilişkilidir. Her iki çalışma da iyon salınımında en kritik faktörün çevresel asidite olduğunu göstermektedir. Klinik açıdan değerlendirildiğinde, hastaların tedavi süresince özellikle tedavinin erken dönemlerinde ve asidik besin tüketiminin arttığı durumlarda daha yüksek düzeyde metal iyonlarına maruz kalabileceği söylenebilir. Ni'nin baskın salınımı, duyarlılık ve alerjik reaksiyon riskleri nedeniyle özel önem taşımaktadır; Zn'nin düşük düzeylerde salınımı ise biyoyumluluk açısından görece olumlu bir bulgudur.

Hwang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (Hwang ve ark., 2001) farklı üreticilere ait materyallerden hazırlanmış 320 simüle sabit ortodontik aparey, yapay tükürükte çeşitli bekletme sürelerine tabi tutulmuş ve Ni, Cr, Fe, Cu ve Ti iyonlarının salınımları ICP-MS ile değerlendirilmiştir. Bulgular, metal iyonlarının salınımının özellikle ilk günlerde en yüksek seviyede olduğunu ve zamanla plato eğilimine girdiğini göstermiştir. En dikkat çekici bulgu, Ni ve Cr salınımındaki kademeli artış, Cu salınımındaki düzensiz seyir ve Ti salınımının cihazın tespit limitinin altında kalmasıdır. Ni açısından özellikle bazı gruplarda ilk gün ve üçüncü günde hızlı bir artış gözlenmiş, ancak ikinci haftadan sonra salınım plato seviyesine ulaşmıştır. Cr salınımı ise özellikle ilerleyen haftalarda belirgin artış göstermiştir. Cu salınımı yalnızca bazı gruplarda anlamlı seviyelere ulaşmış, Ti salınımı ise tespit edilemeyecek kadar düşük kalmıştır.

Bizim çalışmamızla birlikte değerlendirildiğinde, iyon salınımında en kritik dönemin bekletme sürecinin ilk günleri olduğu görülmektedir. Literatürde düşük pH koşullarında korozyon aktivitenin arttığı ve iyon salınımının hızlandığı bildirilmiştir (Huang, 2005; Danaei ve ark., 2011). Yalnızca 28. günde ölçüm yapılan çalışmamızda erken dönemdeki salınım pikleri gözlemlenememiştir. Bununla birlikte, beyazlatıcı ajanlara maruziyet sonrası uzun dönem bekletme prosedüründe belirgin artışa rastlanmaması, iyon salınımının zamanla dengeye

ulaştığını düşündürmektedir. Element bazında değerlendirildiğinde, her iki çalışmada da Ni en baskın salınım gösteren element olarak öne çıkmıştır. Ni'nin yüksek reaktivitesi ve biyouyumluluk açısından taşıdığı risk literatürle de uyumludur (Faccioni ve ark., 2003; Staffolani ve ark., 1999). Cr salınımı daha düşük seviyelerde bulunmuş, bu bulgu krom oksit tabakasının koruyucu rolünü desteklemektedir. Cu salınımı düzensiz seyir göstermiştir ve lehim bölgelerinin korozyona yatkınlığı ile açıklanabilir. Zn salınımı her iki çalışmada da Ni ve Cu'ya kıyasla düşük düzeylerde gerçekleşmiş olup, biyouyumluluk açısından görece olumlu bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Ti salınımı ise bir çalışmada tespit limitinin altında kalırken, diğerinde düşük düzeylerde ölçülebilmektedir.

Bulgular, iyon salınımında en kritik faktörün çevresel asidite olduğunu ve özellikle tedavinin erken dönemlerinde metal iyonu maruziyetinin daha yüksek olabileceğini göstermektedir. Ni'nin baskın salınımı biyouyumluluk açısından en önemli risk faktörünü oluştururken, Zn'nin düşük seviyelerde salınımı görece güvenli bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

Cu eklenmiş Ni-Ti ark telleri ve farklı paslanmaz çelik ile Ti alaşımlarından üretilmiş braketlerde yapılan çalışmada (Darabara ve ark., 2007), Gemini braket dışında tüm materyallerin pitting korozyonuna dirençli olduğu, ancak 28 günlük galvanik korozyon deneyleri sonrasında laktik asit çözeltisinde ölçülebilir miktarda Ni ve Cr iyonlarının bulunduğu rapor edilmiştir. Bu bulgu, galvanik çiftlerin varlığının iyon salınımını artırabileceğini göstermektedir. Mevcut tez çalışmamızda ise üç farklı paslanmaz çelik braket markası %40 HP ve %45 KP içeren ofis tipi beyazlatma ajanlarına maruz bırakıldıktan sonra yapay tükürük ortamında 28 gün bekletmeye tabi tutulmuş ve ICP-OES ile iyon salınımları değerlendirilmiştir. İki çalışmanın sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, hem asidik ortamlarda (laktik asit) hem de oksidan özellik gösteren beyazlatıcı ajanlarla temasta nikel ve kromun en dikkat çeken elementler olduğu görülmektedir. Her iki çalışmanın da ortak noktası, nikelin biyouyumluluk açısından en kritik element olarak öne çıkmasıdır.

Ortodontik apareylerde geri dönüştürülmüş braket ve ark tellerinin kullanıldığı çalışmada (Gürsoy ve ark., 2005), özellikle geri dönüştürülmüş materyallerin birlikte yer aldığı gruptan en yüksek düzeyde Cr, Fe ve Ti salınımı elde edilmiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş materyallerin kullanıldığı iki grupta Cu, Cr ve Ti salınımlarının yeni materyallerin kullanıldığı gruplara kıyasla anlamlı derecede daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Ni salınımı açısından ise gruplar

arasında belirgin fark bulunmamıştır. Bu bulgular, özellikle geri dönüştürülmüş apareylerin korozyona daha duyarlı olduğunu ve iyon salınımının arttığını göstermektedir. Her iki çalışmada da Ni iyon salınımı öne çıkarken, Cr ve Ti salınımının geri dönüştürülmüş materyallerde daha yüksek seviyelerde gözlenmesi, üretim ve yüzey özelliklerinin korozyon davranışında kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın özgün yönü, yüksek konsantrasyona sahip ofis tipi beyazlatma ajanlarının (%40 HP ve %45 KP) farklı markalara ait paslanmaz çelik braketlerden iyon salınımına etkisini doğrudan değerlendiren az sayıdaki çalışmadan biri olmasıdır. Literatürdeki birçok araştırma, ya yalnızca ortodontik tellerin farklı pH koşullarında korozyonunu ya da daha düşük konsantrasyonlu beyazlatıcı ajanların materyaller üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca mevcut çalışmalar genellikle birkaç metal iyonuna odaklanırken, bu çalışmada Ni, Cr, Co, Sr, Cu, Zn, Ti, Pb ve Cd dahil olmak üzere dokuz farklı metal iyonunun salınımı ICP-OES gibi yüksek duyarlılığa sahip bir yöntemle analiz edilmiştir. Bu durum, çalışmanın hem kapsam hem de metodoloji açısından literatüre katkı sağlayan önemli bir yenilikçi yönünü oluşturmaktadır.

Elde edilen bulgular, ortodontik tedavi sırasında estetik beklentileri karşılamak amacıyla ofis tipi beyazlatma talep eden hastalarda, braketlerden potansiyel metal iyon salınımının göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Özellikle Ni ve Cr gibi biyouyumluluk açısından kritik öneme sahip iyonların serbest kalabilme ihtimali, uzun dönemli maruziyetlerde alerjik reaksiyonlar veya mukozal irritasyon risklerini gündeme getirmektedir. Bununla birlikte, çalışmada gözlenen iyon salınım miktarlarının klinik açıdan tolere edilebilir düzeylerde olduğu görülmüş, bu da beyazlatıcı uygulamaların kontrollü koşullarda güvenli bir şekilde gerçekleştirilebileceğini düşündürmektedir. Yine de beyazlatma işlemlerinin özellikle metal alerjisi öyküsü olan bireylerde dikkatle planlanması, kullanılacak ajanların konsantrasyon ve temas süresinin titizlikle belirlenmesi ve hastaların uzun dönemli takibinin yapılması klinik açıdan önem arz etmektedir.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Ölçümler yalnızca 28. günde yapılmış, bu nedenle erken dönemdeki iyon salınım pikleri gözlemlenememiştir. Ayrıca yalnızca statik in vitro model kullanılmış, gerçek ağız ortamındaki dinamik koşullar (salya akışı, sıcaklık değişimi, pH dalgalanması) modellenmemiştir. Braket dışındaki diğer ortodontik materyaller (teller, ligatürler) çalışmaya dahil edilmemiştir. Beyazlatıcı ajanların pH değerleri bilinse de sistematik pH karşılaştırması yapılmamıştır. Ayrıca iyon salınımına neden olabilecek yüzey değişimleri mikroskobik düzeyde (örneğin SEM ile) analiz edilmemiştir. Ölçülen iyon düzeyleri ile uluslararası biyoyumluluk ve toksisite sınırlarının daha detaylı karşılaştırılması da çalışmanın geliştirilmesi gereken yönlerinden biridir. Tüm bu sınırlılıklara rağmen çalışma, ofis tipi beyazlatmanın ortodontik materyaller üzerinde oluşturabileceği potansiyel biyolojik riskleri ortaya koyarak literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmamızın sınırlılıkları göz önüne alındığında, gelecekte yapılacak araştırmalarda erken dönem salınımların incelenebilmesi açısından, iyon salınımı ölçümlerinin farklı zaman noktalarında tekrar edilmesi önerilir. Ayrıca gerçek ağız ortamını yansıtan dinamik modellerin dahil edildiği deneysel tasarımlar geliştirilebilir. Farklı ortodontik materyallerin dahil edilmesiyle daha geniş bir biyoyumluluk değerlendirmesi yapılabilir. Son olarak iyon salınımına eşlik edebilecek olası yüzey değişimlerinin tespit edilebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yüzey analiz tekniklerinin kullanılması, materyal-solüsyon etkileşimlerinin daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı üreticilere ait paslanmaz çelik ortodontik braketlerin %40 HP ve %45 KP içeren ofis tipi beyazlatıcı ajanlarla temas sonrası 28. günde ICP-OES yöntemi ile farklı metal iyonlarının salınım düzeyleri incelenmiştir. Bulgulara göre:

- Ni salınımı;

Hem materyal markasına hem de solüsyon tipine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

En yüksek Ni salınımı 3M Solventum-KP (35,52 µg/L) ve AO Mini Master-HP (20,96 µg/L) gruplarında, en düşük Ni salınımı D Discovery Smart -YT (0,91 µg/L) grubunda saptanmıştır.

D Discovery Smart braketlerin diğer gruplara kıyasla her ortamda daha düşük Ni salınımı göstermesi, kullanılan alaşım bileşiminin ve üretim sürecinin korozyon direncinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

- Co salınımı;

En yüksek AO Mini Master-KP (2,67 µg/L) grubunda, en düşük 3M Solventum-HP (1,09 µg/L) grubunda saptanmıştır.

Genel olarak AO Mini Master grupları tüm solüsyonlarda diğer materyallere kıyasla daha yüksek Co salınımı göstermiştir.

Buna karşılık, 3M Solventum ve D Discovery Smart materyalleri özellikle HP solüsyonunda daha düşük Co düzeyleri sergilemiştir.

- Cr salınımı;

En yüksek AO Mini Master-KP (29,56 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart-YT (2,04 µg/L) grubunda saptanmıştır.

AO Mini Master grubu özellikle KP ve HP solüsyonlarında anlamlı derecede yüksek Cr salınımı göstermiştir.

3M Solventum ve D Discovery Smart materyalleri arasında YT koşullarında anlamlı bir fark bulunmazken, her iki marka AO Mini Master'a göre belirgin olarak daha düşük Cr salınım değerleri sergilemiştir. Bu bulgu, AO Mini Master braketlerin beyazlatıcı ajanlarla etkileşiminde daha yüksek korozyon eğilimi taşıdığını göstermektedir.

- Cu salınımı;

En yüksek AO Mini Master -KP (47,22 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart -HP (7,69 µg/L) grubunda saptanmıştır.

AO Mini Master braketler, özellikle KP ve HP solüsyonlarında diğer markalara kıyasla belirgin şekilde daha yüksek Cu salınımı göstermiştir.

3M Solventum ve D Discovery Smart grupları ise tüm solüsyonlarda birbirine yakın ve düşük düzeylerde kalmıştır. Bu bulgular, Cu salınımında özellikle AO Mini Master braketlerin beyazlatıcı solüsyonlarla birlikte korozyona daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

- Sr salınımı;

En yüksek AO Mini Master-HP (139,99 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart -HP (50,03 µg/L) grubunda saptanmıştır.

Özellikle AO Mini Master braketler, hem KP (135,66 µg/L) hem de HP (139,99 µg/L) solüsyonlarında diğer markalara göre belirgin derecede yüksek Sr salınımı göstermiştir.

Buna karşılık D Discovery Smart materyali, tüm solüsyonlarda düşük düzeyde Sr salınımı ile öne çıkmıştır. 3M Solventum materyali ise KP solüsyonunda nispeten artış (102,58 µg/L) göstermiş olsa da, genel olarak AO Mini Master'a kıyasla daha düşük değerlerde kalmıştır.

- Zn salınımı;

En yüksek 3M Solventum-KP (27,23 µg/L) grubunda, en düşük AO Mini Master-HP (15,09 µg/L) grubunda saptanmıştır.

AO Mini Master braketler solüsyonlara göre anlamlı fark göstermiştir. T ile KP ve HP arasında fark yokken, KP ile HP arasında anlamlı fark vardır.

D Discovery Smart materyali de solüsyonlara göre anlamlı fark göstermiştir. Ancak değerler birbirine yakın olup, 3M Solventum ve AO Mini Master'a kıyasla daha düşük düzeylerde kalmıştır.

3M Solventum materyali ise solüsyonlara göre istatistiksel olarak anlamlı fark göstermemiştir.

- Ti salınımı;

En yüksek AO Mini Master-KP (5,69 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart-YT, D Discovery Smart-KP ve D Discovery Smart-HP gruplarında (0 µg/L) saptanmıştır.

YT, KP ve HP solüsyonlarında materyaller arasında anlamlı fark bulunmuştur.

Her üç solüsyonda da D Discovery Smart materyali, AO Mini Master ve 3M'ye göre daha düşük değerler göstermiştir.

D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında tüm solüsyonlarda anlamlı fark vardır.

3M Solventum ile AO Mini Master arasında fark yoktur; 3M ile D arasında ise HP grubunda anlamlı fark saptanmıştır.

- Pb salınımı;

En yüksek AO Mini Master-KP (8,69 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart -YT ve D Discovery Smart-KP (0 µg/L) gruplarında saptanmıştır.

YT, KP ve HP solüsyonlarında materyaller arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur. YT grubunda 3M Solventum ile AO Mini Master arasında fark yokken, 3M Solventum ile D Discovery Smart ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark vardır.

KP grubunda 3M Solventum ile AO Mini Master ve D Discovery Smart arasında fark yoktur; D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark vardır.

HP grubunda 3M Solventum ile AO Mini Master arasında fark yokken, 3M Solventum ile D Discovery Smart ve D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında anlamlı fark vardır.

- Cd salınımı;

En yüksek AO Mini Master-YP (1,38 µg/L) grubunda, en düşük D Discovery Smart -YT, D Discovery Smart-KP ve D Discovery Smart-HP (0 µg/L) gruplarında saptanmıştır.

YT, KP ve HP solüsyonlarında materyaller arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur. Her üç solüsyonda da D Discovery Smart braketlerin değerleri 0 µg/L olup, AO Mini Master'a göre anlamlı fark göstermiştir. 3M Solventum ile D Discovery Smart ve AO Mini Master arasında anlamlı fark bulunmazken, D Discovery Smart ile AO Mini Master arasında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır.

- Beyazlatıcı solüsyonların etkisi genel olarak iyon salınım düzeylerini artırıcı yönde olmuştur. Özellikle AO Mini Master -KP ve 3M Solventum -KP gruplarında Ni, Cr, Cu ve Sr gibi elementlerde yüksek salınım düzeyleri

gözlenmiştir. Bu da KP'nin bazı materyaller üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir.

- AO Mini Master-HP grubu, Pb ve Cd gibi toksik potansiyeli yüksek elementlerde istatistiksel olarak anlamlı artış göstermiştir. Bu bulgu, hidrojen peroksit solüsyonunun AO Mini Master braket materyali ile etkileşime girerek çözünmeyi artırabileceğini göstermektedir.
- Genel olarak, AO Mini Master ve 3M Solventum braket grupları, hem HP hem KP solüsyonları ile birlikte en yüksek iyon salınım değerlerini göstermiştir. Bu durum, bu iki markanın beyazlatma ajanlarıyla birlikte kullanıldığında korozyon eğilimlerinin daha fazla olabileceğini ortaya koymaktadır.
- D Discovery Smart grubu, her iki solüsyonla da en düşük iyon salınım değerlerini göstermiştir. Bu nedenle biyouyumluluk açısından en güvenilir marka olarak öne çıkmıştır.
- Ölçümler yalnızca 28. güne (T1) ait olup, ilk 1. gün verileri (T0) mevcut değildir. Literatürde erken dönemde daha yüksek iyon salınımı rapor edildiği için, çalışmamızda tespit edilen değerler geç dönem iyon salınımlarını yansıtmaktadır.
- Her ne kadar bazı farklar gözlene de, braket materyali ile solüsyon etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık göstermemiştir ($p > 0.05$). Bu da materyal-solüsyon çiftlerinin tek başına belirleyici olmayabileceğini, bileşik etkilerin ve üretim sürecinin de rol oynadığını düşündürmektedir.
- Ofis tipi bleaching uygulanacak vakalarda braket materyali seçimi, özellikle AO Mini Master ve 3M Solventum gibi yüksek salınım potansiyeli gösteren markalarda dikkatle yapılmalıdır.
- D Discovery Smart gibi düşük salınım eğilimli materyaller, estetik talepler doğrultusunda yapılacak beyazlatma işlemlerinde tercih edilebilir alternatifler olarak değerlendirilebilir.
- Beyazlatıcı ajan seçimi yapılırken sadece içeriği değil, konsantrasyonu ve uygulama süresiyle birlikte ortodontik materyallerle olan etkileşimi de göz önünde bulundurulmalıdır.

- Bu çalışmada 28. gün sonuçları değerlendirildiğinden, erken dönem salınımlarının da ölçüldüğü zaman bazlı ek çalışmalar ile bu sonuçların desteklenmesi önerilir.
- Ayrıca iyon salınımına bağlı biyolojik etkilerin daha iyi anlaşılması için sitotoksisite, genotoksisite ve hücre düzeyinde biyouyumluluk testlerinin de entegre edildiği kapsamlı analizlere ihtiyaç vardır.



KAYNAKLAR

- Abdalla, M. M., Sayed, O., Lung, C. Y. K., Rajasekar, V., & Yiu, C. K. Y. (2024). Applications of Bioactive Strontium Compounds in Dentistry. *J Funct Biomater*, 15(8), 216. <https://doi.org/10.3390/jfb15080216>
- Abdulkareem, M. R. ve Al-Mulla, A. A. (2014). Effects of three different types of intracoronal bleaching agents on shear bond strength of stainless steel and sapphire brackets bonded to endodontically treated teeth (An in vitro study). *J. Baghdad Coll. Dent.*, 26(3), 149-155. <https://jbcd.uobaghdad.edu.iq/index.php/jbcd/article/view/533>
- Al-Salehi, S. (2009). Effects of bleaching on mercury ion release from dental amalgam. *J Dent Res*, 88(3), 239-243. <https://doi.org/10.1177/0022034508328676>
- Al-Salehi, S., Hatton, P., Miller, C., Mcleod, C., & Joiner, A. (2006). The effect of carbamide peroxide treatment on metal ion release from dental amalgam. *Dent Mater J*, 22(10), 948-953. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.10.006>
- Alaçam, T. (2000). *Endodonti*. Şafak Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti.
- Alkahtani, R., Stone, S., German, M., & Waterhouse, P. (2020). A review on dental whitening. *J. Dent.*, 100, 103423. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103423>
- Alkhatib, M., Holt, R., & Bedi, R. (2004). Prevalence of self-assessed tooth discolouration in the United Kingdom. *J Dent.*, 32(7), 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2004.06.002>
- Alkhraisat, M. H., Rueda, C., Cabrejos-Azama, J., Lucas-Aparicio, J., Mariño, F. T., García-Denche, J. T., Jerez, L. B., Gbureck, U., & Cabarcos, E. L. (2010). Loading and release of doxycycline hyclate from strontium-substituted calcium phosphate cement. *Acta Biomater.*, 6(4), 1522-1528. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.10.043>
- Almqvist, H., & Lagerlof, F. (1993). Effect of intermittent delivery of fluoride to solution on root hard-tissue de-and remineralization measured by 125I absorptiometry. *J Dent Res*, 72(12), 1593-1598. <https://doi.org/10.1177/00220345930720121101>
- Almqvist, H., & Lagerlöf, F. (1993). Influence of Constant Fluoride Levels in Solution on Root Hard Tissue De-and Remineralization Measured by 125I Absorptiometry. *Caries Res.*, 27(2), 100-105. <https://doi.org/10.1159/000261525>
- Alp, O. (2008). *Arsenik, antimon ve kalayın tungsten sarmalda tuzaklanarak hidrür oluşturmali atomik absorbsiyon spektrometri yöntemi ile tayini ve girişim çalışmaları* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Alshammari, H., Neilands, J., Svensäter, G., & Stavropoulos, A. (2021). Antimicrobial potential of strontium hydroxide on bacteria associated with peri-implantitis. *Antibiotics*, 10(2), 150. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10020150>
- CS Analytical. (t.y.). *Comparison of atomic spectroscopy techniques and the advantages of ICP-MS vs AA & ICP-OES*. <https://csanalytical.com/comparison-of-atomic-spectroscopy-techniques-and-the-advantages-of-icp-ms-vs-aa-icp-oes/> adresinden 10 Ekim 2025 tarihinde alınmıştır.
- Arboleda-Lopez, C., Manasse, R., Viana, G., Bedran-Russo, A., & Evans, C. (2015). Tooth whitening during orthodontic treatment: a six-month in vitro assessment of effectiveness and stability. *Int J Dent Oral Health*, 1(4), 1–10. <https://doi.org/10.16966/2378-7090.110>
- Arens, D. (1989). The role of bleaching in esthetics. *Dent Clin North Am*, 33(2), 319-336.
- Badawi, K., El Sharazly, B. M., Negm, O., Khan, R., & Carter, W. G. (2024). Is cadmium genotoxicity due to the induction of redox stress and inflammation? a systematic review. *Antioxidants*, 13(8), 932. <https://doi.org/10.3390/antiox13080932>

- Baldwin, D. R. ve Marshall, W. J. (1999). Heavy metal poisoning and its laboratory investigation. *Ann Clin Biochem*, 36(3), 267–300. <https://doi.org/10.1177/000456329903600301>
- Bánóczy, J., Roed-Petersen, B., Pindborg, J. J., & Inovay, J. (1979). Clinical and histologic studies on electrogally induced oral white lesions. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 48(4), 319-323. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(79\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0030-4220(79)90031-8)
- Barrett, R. D., Bishara, S. E., & Quinn, J. K. (1993). Biodegradation of orthodontic appliances. Part I. Biodegradation of nickel and chromium in vitro. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 103(1), 8-14. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70098-9](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70098-9)
- Bass, J. K., Fine, H., & Cisneros, G. J. (1993). Nickel hypersensitivity in the orthodontic patient. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 103(3), 280-285. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70009-D](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70009-D)
- Baydaş, Y. B., Yavuz, Y. İ., ve Kiki, A. A. (2005). Ortodontik ark tellerinin farklı pH seviyelerinde iyon salınımlarının in-vitro olarak değerlendirilmesi. *Atatürk Üniv. Diş Hekim. Fak. Derg.*, 15(2), 11–20.
- Berge, M., Gjerdet, N. R., & Erichsen, E. S. (1982). Corrosion of silver soldered orthodontic wires. *Acta Odontol. Scand.*, 40(2), 75-79. <https://doi.org/10.3109/00016358209041118>
- Berman, L. (1982). Intrinsic staining and hypoplastic enamel: etiology and treatment alternatives. *Gen Dent*, 30(6), 484-488.
- Berradja, A., Bratu, F., Benea, L., Willems, G., ve Celis, J.-P. (2006). Effect of sliding wear on tribocorrosion behaviour of stainless steels in a Ringer's solution. *Wear*, 261(9), 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.003>
- Bhaskar, S. N. (1991). *Orban's oral histology and embryology*. Elsevier India.
- Bishara, S. E., Barrett, R. D., & Selim, M. I. (1993). Biodegradation of orthodontic appliances. Part II. Changes in the blood level of nickel. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 103(2), 115-119. [https://doi.org/10.1016/S0889-5406\(05\)81760-3](https://doi.org/10.1016/S0889-5406(05)81760-3)
- Boss, C. B. ve Fredeen, K. J. (1999). *Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectroscopy*. PerkinElmer.
- Bothwell, T., Charlton, R., Cook, J., ve Finch, C. (1979). *Iron metabolism in man*. Blackwell Scientific.
- Bowles, W. H., & Ugwuneri, Z. (1987). Pulp chamber penetration by hydrogen peroxide following vital bleaching procedures. *J Endod*, 13(8), 375-377. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(87\)80196-6](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(87)80196-6)
- Brantley, W. A., & Eliades, T. (2001). Orthodontic materials: scientific and clinical aspects. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 119(6), 672-673. <https://doi.org/10.1067/MOD.2001.115853>
- Brauer, D. S., Karpukhina, N., Kedia, G., Bhat, A., Law, R. V., Radecka, I., & Hill, R. G. (2013). Bactericidal strontium-releasing injectable bone cements based on bioactive glasses. *J R Soc Interface*, 10(78), 20120647. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0647>
- Brehm, L. W. H., S.M.; Kucherira, C.S. (2000). *U.S. Patent No. 6,053,729* (United States Patent No. U. S. P. a. T. Office.
- Brune, D. (1986). Metal release from dental biomaterials. *Biomaterials*, 7(3), 163-175. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(86\)90097-9](https://doi.org/10.1016/0142-9612(86)90097-9)
- Cai, Z., Nakajima, H., Woldu, M., Berglund, A., Bergman, M., & Okabe, T. (1999). In vitro corrosion resistance of titanium made using different fabrication methods. *Biomaterials*, 20(2), 183-190. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(98\)00160-4](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(98)00160-4)

- Caner, C. (2015). *Bazı metal iyonlarının bulutlanma noktası ekstraksiyonu ile zenginleştirilerek USN-ICP-OES cihazı ile tayini* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Carey, C. M. (2014). Tooth whitening: what we now know. *J Evid Based Dent Pract*, 14, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2014.02.006>
- Chakravarthi, S., Padmanabhan, S., & Chitharanjan, A. B. (2012). Allergy and orthodontics. *J Orthod*, 1(4), 83-87. <https://doi.org/10.4103/2278-0203.105871>
- Coley-Smith, A., & Rock, W. (1999). Distortion of metallic orthodontic brackets after clinical use and debond by two methods. *Br J Orthod*, 26(2), 135-139. <https://doi.org/10.1093/ortho/26.2.135>
- Consolaro, A., Consolaro, R. B., & Francischone, L. (2013). Clarifications, guidelines and questions about the dental bleaching" associated" with orthodontic treatment. *Dental Press J Orthod*, 18, 4-10. <https://doi.org/10.1590/s2176-94512013000500002>
- Cooper, J. S., Bokmeyer, T. J., & Bowles, W. H. (1992). Penetration of the pulp chamber by carbamide peroxide bleaching agents. *J Endod*, 18(7), 315-317. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(06\)80479-6](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(06)80479-6)
- Cortada, M., Giner, L., Costa, S., Gil, F., Rodri' guez, D., & Planell, J. (2000). Galvanic corrosion behavior of titanium implants coupled to dental alloys. *J Mater Sci Mater Med*, 11(5), 287-293. <https://doi.org/10.1023/a:1008905229522>
- Çömlekoğlu, E., Dündar, M., Güngör, M., Aladağ, A., & Gökçe, B. (2008). Allergy in dentistry: General terms and testing materials. *EÜ Diş Hek Fak Derg*, 29, 67-79.
- Dahl, J. E., & Pallesen, U. (2003). Tooth bleaching—a critical review of the biological aspects. *Crit Rev Oral Biol Med*, 14(4), 292-304. <https://doi.org/10.1177/154411130301400406>
- Danaei, S. M., Safavi, A., Roeinpeikar, S. M., Oshagh, M., Iranpour, S., & Omidkhoda, M. (2011). Ion release from orthodontic brackets in 3 mouthwashes: an in-vitro study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 139(6), 730-734. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.03.004>
- Darabara, M. S., Bourithis, L. I., Zinelis, S., & Papadimitriou, G. D. (2007). Metallurgical characterization, galvanic corrosion, and ionic release of orthodontic brackets coupled with Ni-Ti archwires. *J Biomed Mater Res Part B*, 81(1), 126-134. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30645>
- de Oliveira, M. N., Vidigal, M. T. C., Vieira, W., Lins-Candeiro, C. L., Oliveira, L. M., Nascimento, G. G., da Silva, G. R., & Paranhos, L. R. (2024). Assessment of color changes and adverse effects of over-the-counter bleaching protocols: a systematic review and network meta-analysis. *Clin Oral Investig*, 28(3), 189. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05595-5>
- Deguchi, T., Ito, M., Obata, A., Koh, Y., Yamagishi, T., & Oshida, Y. (1996a). Trial production of titanium orthodontic brackets fabricated by metal injection molding (MIM) with sintering. *J Dent Res*, 75(7), 1491-1496. <https://doi.org/10.1177/00220345960750070901>
- Demarco, F. F., Meireles, S. S., ve Masotti, A. S. (2009). Over-the-counter whitening agents: a concise review. *Braz. Oral Res*, 23(Suppl. 1), 64–70. <https://doi.org/10.1590/s1806-83242009000500010>
- Dezotti, M. S., Souza, M. H. Jr., ve Nishiyama, C. K. (2002). Evaluation of pH variation and cervical dentin permeability in teeth submitted to bleaching treatment [Avaliação da variação de pH e da permeabilidade da dentina cervical em dentes submetidos ao tratamento clareador]. *Pesqui Odontol Bras*, 16(3), 263–268. <https://doi.org/10.1590/s1517-74912002000300014>
- Doğan, M., & Ulusoy, Ç. (2013). Ortodontide biyouyumluluk. *Acta Odontologica Turcica*, 30(2), 110-114.

- Dostalova, T., Jelinkova, H., Housova, D., Sulc, J., Nemec, M., Miyagi, M., Junior, A. B., & Zanin, F. (2004). Diode laser-activated bleaching. *Braz Dent J*, 15, SI-3.
- Dwivedi, A., Tikku, T., Khanna, R., Maurya, R. P., Verma, G., & Murthy, R. (2015). Release of nickel and chromium ions in the saliva of patients with fixed orthodontic appliance: An: in-vivo: study. *Natl J Maxillofac Surg*, 6(1), 62-66. <https://doi.org/10.4103/0975-5950.168224>
- Eachempati, P., Nagraj, S. K., Krishanappa, S. K. K., Gupta, P., & Yaylali, I. E. (2018). Home-based chemically-induced whitening (bleaching) of teeth in adults. *Cochrane Database Syst Rev*, 12(12), CD006202. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006202.pub2>
- Edman, B., & Möller, H. (1982). Trends and forecasts for standard allergens in a 12-year patch test material. *Contact dermatitis*, 8(2), 95-104. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1982.tb04153.x>
- Eliades, T. (2007). Orthodontic materials research and applications: part 2. Current status and projected future developments in materials and biocompatibility. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 131(2), 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.12.029>
- Eliades, T., & Athanasiou, A. E. (2002). In vivo aging of orthodontic alloys: implications for corrosion potential, nickel release, and biocompatibility. *Angle Orthod*, 72(3), 222-237. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(2002\)072<0222:IVAOOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(2002)072<0222:IVAOOA>2.0.CO;2)
- Eliades, T., Pratsinis, H., Kletsas, D., Eliades, G., & Makou, M. (2004). Characterization and cytotoxicity of ions released from stainless steel and nickel-titanium orthodontic alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 125(1), 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2003.09.009>
- Eliades, T., Zinelis, S., Bourauel, C., & Eliades, G. (2008). Manufacturing of orthodontic brackets: a review of metallurgical perspectives and applications. *Recent Patents on Materials Science*, 1(2), 135-139. <https://doi.org/10.2174/1874465610801020135>
- Faccioni, F., Franceschetti, P., Cerpelloni, M., & Fracasso, M. E. (2003). In vivo study on metal release from fixed orthodontic appliances and DNA damage in oral mucosa cells. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 124(6), 687-693; discussion 693-684. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2003.09.010>
- Féliz-Matos, L., Hernández, L. M., & Abreu, N. (2015). Dental bleaching techniques; hydrogen-carbamide peroxides and light sources for activation, an update. Mini review article. *Open Dent J*, 8, 264 –268. <https://doi.org/10.2174/1874210601408010264>
- Fernandez-Minano, E., Ortiz, C., Vicente, A., Calvo Guirado, J. L., & Ortiz, A. J. (2011). Metallic ion content and damage to the DNA in oral mucosa cells of children with fixed orthodontic appliances. *Biometals*, 24(5), 935. <https://doi.org/10.1007/s10534-011-9448-z>
- Fernández García, B., Lobo Revilla, L., ve Pereiro García, M. R. (2019). Atomic absorption spectrometry: fundamentals, instrumentation and capabilities. *Encyclopedia of Analytical Science* içinde. Elsevier.
- Fraga, C. G., & Oteiza, P. I. (2002). Iron toxicity and antioxidant nutrients. *Toxicology*, 180(1), 23-32. [https://doi.org/10.1016/s0300-483x\(02\)00379-7](https://doi.org/10.1016/s0300-483x(02)00379-7)
- Freitas, M. P., Oshima, H. M., & Menezes, L. M. (2011). Release of toxic ions from silver solder used in orthodontics: an in-situ evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 140(2), 177-181. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2010.06.024>
- Gabriele Floria, D., & Cand, L. (1997). Metal injection molding in orthodontics. *Virtual J Orthod*, 2, 1.
- Gioka, C., Bourauel, C., Zinelis, S., Eliades, T., Silikas, N., & Eliades, G. (2004). Titanium orthodontic brackets: structure, composition, hardness and ionic release. *Dent Mater J*, 20(7), 693-700. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2004.02.008>

- Gjerdet, N. R., Kallus, T., & Hensten-Pettersen, A. (1987). Tissue reactions to implanted orthodontic wires in rabbits. *Acta Odontol Scand*, 45(3), 163-169. <https://doi.org/10.3109/00016358709098855>
- Gomes, M. N., Dutra, H., Morais, A., Sgura, R., & Devito-Moraes, A. G. (2017). In-Office Bleaching During Orthodontic Treatment. *J Esthet Restor Dent*, 29(2), 83-92. <https://doi.org/10.1111/jerd.12276>
- Gökay, O., Müjdecı, A., & Algin, E. (2005). In vitro peroxide penetration into the pulp chamber from newer bleaching products. *Int Endod J*, 38(8), 516-520. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2005.00979.x>
- Greenwall, L. (2005). Bleaching techniques in restorative dentistry (s. 132–163) içinde. *Bleaching techniques in restorative dentistry*. Martin Dunitz.
- Greppi, A. L. (1991). *A prospective case-control study of nickel hypersensitivity reactions in orthodontic patients* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Toronto Üniversitesi.
- Grimaudo, N. (2001). Biocompatibility of nickel and cobalt dental alloys. *Gen Dent*, 49(5), 498-505
- Grimsdottir, M. R., Gjerdet, N. R., & Hensten-Pettersen, A. (1992). Composition and in vitro corrosion of orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 101(6), 525-532. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(92\)70127-V](https://doi.org/10.1016/0889-5406(92)70127-V)
- Grosogoeat, B., Vaicelyte, A., Gauthier, R., Janssen, C., & Le Borgne, M. (2022). Toxicological risks of the cobalt–chromium alloys in dentistry: a systematic review. *Materials*, 15(17), 5801. <https://doi.org/10.3390/ma15175801>
- Guida, A., Towler, M. R., Wall, J. G., Hill, R. G., ve Eramo, S. (2003). Preliminary work on the antibacterial effect of strontium in glass ionomer cement. *J Mater Sci Lett*, 22(20), 1401–1403. <https://doi.org/10.1023/A:1025794927195>
- Gürsoy, S., Acar, A. G., & Şeşen, Ç. (2005). Comparison of metal release from new and recycled bracket-archwire combinations. *Angle Orthod*, 75(1), 92-94. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(2005\)075<0092:COMRFN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(2005)075<0092:COMRFN>2.0.CO;2)
- Gwinnett, A. J. (1982). Corrosion of resin-bonded orthodontic brackets. *Am J Orthod*, 81(6), 441-446. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(82\)90421-3](https://doi.org/10.1016/0002-9416(82)90421-3)
- Haddad, A. C. S. S., Tortamano, A., Souza, A. L. d., & Oliveira, P. V. d. (2009). An in vitro comparison of nickel and chromium release from brackets. *Braz Oral Res*, 23, 399-406. <https://doi.org/10.1590/s1806-83242009000400009>
- Hafez, H. S., Selim, E. M., Kamel Eid, F. H., Tawfik, W. A., Al-Ashkar, E. A., & Mostafa, Y. A. (2011). Cytotoxicity, genotoxicity, and metal release in patients with fixed orthodontic appliances: a longitudinal in-vivo study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 140(3), 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2010.05.025>
- Hannig, C., Zech, R., Henze, E., Dorr-Tolui, R., & Attin, T. (2003). Determination of peroxides in saliva—kinetics of peroxide release into saliva during home-bleaching with Whitestrips® and Vivastyle®. *Arch Oral Biol*, 48(8), 559-566. [https://doi.org/10.1016/s0003-9969\(03\)00102-x](https://doi.org/10.1016/s0003-9969(03)00102-x)
- Hannig, M., & Joiner, A. (2005). The structure, function and properties of the acquired pellicle. In *The teeth and their environment: physical chemical and biochemical influences Monographs in oral science* 19, 29–64. <https://doi.org/10.1159/000090585>
- Hardan, L., Bourgi, R., Flores-Ledesma, A., Devoto, W., Devoto, E., Fernández-Barrera, M. Á., Kharouf, N., & Cuevas-Suárez, C. E. (2024). Is a white diet necessary for tooth bleaching procedures? A systematic review and meta-analysis. *Dent J*, 12(4), 118. <https://doi.org/10.3390/dj12040118>

- Haywood, V. B., & Heymann, H. (1991). Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int*, 22(7), 515-523.
- Haywood, V. B., Leech, T., Heymann, H. O., Crumpler, D., & Bruggers, K. (1990). Nightguard vital bleaching: effects on enamel surface texture and diffusion. *Quintessence Int*, 21(10), 801-804.
- Henderson, T. J. (2025). *Atomic absorption spectroscopy (AAS) vs. inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy: Which elemental analysis technique is right for your lab?* Lab Manager. <https://www.labmanager.com/atomic-absorption-spectroscopy-aas-vs-inductively-coupled-plasma-icp-spectroscopy-which-elemental-analysis-technique-is-right-for-your-lab-33663>
- Hou, X. ve Jones, B. T. (2000). Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry (s. 9468-9485) içinde. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons.
- House, K., Sernetz, F., Dymock, D., Sandy, J. R., & Ireland, A. J. (2008). Corrosion of orthodontic appliances--should we care? *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 133(4), 584-592. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2007.03.021>
- Huang, H.-H. (2005). Variation in corrosion resistance of nickel-titanium wires from different manufacturers. *Angle Orthod*, 75(4), 661-665. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(2005\)75\[661:VICRON\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(2005)75[661:VICRON]2.0.CO;2)
- Huang, H.-H., Chiu, Y.-H., Lee, T.-H., Wu, S.-C., Yang, H.-W., Su, K.-H., & Hsu, C.-C. (2003). Ion release from NiTi orthodontic wires in artificial saliva with various acidities. *Biomaterials*, 24(20), 3585-3592. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(03\)00188-1](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00188-1)
- Huang, T.-H., Yen, C.-C., & Kao, C.-T. (2001). Comparison of ion release from new and recycled orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 120(1), 68-75. <https://doi.org/10.1067/mod.2001.113794>
- Humphrey, S., Sue, P., & Williamson, R. (2001). A review of saliva: normal composition, flow, and function. *J Prosthet Dent*, 85(2), 162-169. <https://doi.org/10.1067/mpr.2001.113778>
- Hunt, N., Cunningham, S., Golden, C., & Sheriff, M. (1999). An investigation into the effects of polishing on surface hardness and corrosion of orthodontic archwires. *Angle Orthod*, 69(5), 433-440. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1999\)069<0433:AIITEO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1999)069<0433:AIITEO>2.3.CO;2)
- Hussain, H. D., Ajith, S. D., & Goel, P. (2016). Nickel release from stainless steel and nickel titanium archwires - An in vitro study. *J Oral Biol Craniofac Res*, 6(3), 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2016.06.001>
- Hwang, C.-J., Shin, J.-S., & Cha, J.-Y. (2001). Metal release from simulated fixed orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 120(4), 383-391. <https://doi.org/10.1067/mod.2001.117911>
- Jadad, E., Montoya, J., Arana, G., Gordillo, L. A., Palo, R. M., & Loguercio, A. D. (2011). Spectrophotometric evaluation of color alterations with a new dental bleaching product in patients wearing orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 140(1), e43-47. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2010.11.021>
- Jadad, E., Montoya, J., Arana, G., Gordillo, L. A. A., Palo, R. M., & Loguercio, A. D. (2011). Spectrophotometric evaluation of color alterations with a new dental bleaching product in patients wearing orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 140(1), e43-e47. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2010.11.021>
- Jayasree, R., Kumar, T. S., Mahalaxmi, S., Abburi, S., Rubaiya, Y., & Doble, M. (2017). Dentin remineralizing ability and enhanced antibacterial activity of strontium and hydroxyl ion co-releasing radiopaque hydroxyapatite cement. *J Mater Sci Mater Med*, 28(6), 95. <https://doi.org/10.1007/s10856-017-5903-x>

- Joiner, A. (2004). Tooth colour: a review of the literature. *Dent. J.*, 32, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2003.10.013>
- Joiner, A., Jones, N., & Raven, S. (1995). Investigation of factors influencing stain formation utilizing an in situ model. *J Adv Oral Res*, 9(4), 471-476. <https://doi.org/10.1177/08959374950090041901>
- Joiner, A., Philpotts, C. J., Ashcroft, A. T., Laucello, M., & Salvaderi, A. (2008). In vitro cleaning, abrasion and fluoride efficacy of a new silica based whitening toothpaste containing blue covarine. *Dent J*, 36, 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2008.02.003>
- Joiner, A., Pickles, M., Matheson, J., Weader, E., Noblet, L., & Huntington, E. (2002). Whitening toothpastes: effects on tooth stain and enamel. *Int Dent J* 52, 424-430. <https://doi.org/10.1111/j.1875-595X.2002.tb00732.x>
- Joiner, A., & Thakker, G. (2004). In vitro evaluation of a novel 6% hydrogen peroxide tooth whitening product. *Dent J*, 32, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2003.10.007>
- Joiner, A., Thakker, G., & Cooper, Y. (2004). Evaluation of a 6% hydrogen peroxide tooth whitening gel on enamel and dentine microhardness in vitro. *Dent J*, 32, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2003.10.010>
- Kawashima, I., Berzins, D. W., Sarkar, N. K., & Ohno, H. (1998). Corrosion of three experimental AgMn-based casting alloys. *Dent Mater J*, 14(6), 448-452. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(99)00020-2)
- Kerosuo, H., Kullaa, A., Kerosuo, E., Kanerva, L., & Hensten-Pettersen, A. (1996). Nickel allergy in adolescents in relation to orthodontic treatment and piercing of ears. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 109(2), 148-154. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(96\)70175-0](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(96)70175-0)
- Khan, H. (2015). *Orthodontic brackets: selection, placement and debonding* (1. Baskı). CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Kheder, W., Al Kawas, S., Khalaf, K., & Samsudin, A. (2021). Impact of tribocorrosion and titanium particles release on dental implant complications—A narrative review. *Jpn Dent Sci Rev*, 57, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2021.09.001>
- Kim, D.-H., Bae, J., Heo, J. H., Park, C. H., Kim, E. B., & Lee, J. H. (2022). Nanoparticles as next-generation tooth-whitening agents: Progress and perspectives. *ACS nano*, 16(7), 10042-10065 <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c01412>.
- Kishta-Derani, M., Neiva, G., Yaman, P., & Dennison, D. (2007). In vitro evaluation of tooth-color change using four paint-on tooth whiteners. *Oper Dent*, 32(4), 394-398. <https://doi.org/10.2341/06-117>
- Kobayashi, S., Ohgoe, Y., Ozeki, K., Hirakuri, K., & Aoki, H. (2007). Dissolution effect and cytotoxicity of diamond-like carbon coatings on orthodontic archwires. *J Mater Sci Mater Med*, 18, 2263-2268. <https://doi.org/10.1007/s10856-007-3118-2>
- Koçak, E. M. (2017). *Sabit ortodontik tedavide kullanılan braket ve tellerin farklı pH değerlerine sahip yapay tükürük sıvısında iyon salınımlarının in-vitro olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Abant İzzet Baysal Üniversitesi.
- Koike, M., Cai, Z., Fujii, H., Brezner, M., & Okabe, T. (2003). Corrosion behavior of cast titanium with reduced surface reaction layer made by a face-coating method. *Biomaterials*, 24(25), 4541-4549. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(03\)00063-2](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00063-2)
- Kuhta, M., Pavlin, D., Slaj, M., Varga, S., Lapter-Varga, M., & Slaj, M. (2009). Type of archwire and level of acidity: effects on the release of metal ions from orthodontic appliances. *Angle Orthod*, 79(1), 102-110. <https://doi.org/10.2319/083007-401.1>

- Kusy, R., Ambrose, W., LaVanier, L., Newman, J., & Whitley, J. (2002). Analyses of rampant corrosion in stainless-steel retainers of orthodontic patients. *J Biomed Mater Res*, 62(1), 106-118. <https://doi.org/10.1002/jbm.10226>
- Kutsal, O. (2022). *Ağız ve diş protezlerinden hasta tükürüğüne salınan iyon miktarının araştırılması* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. <https://hdl.handle.net/11469/3232>
- Küçükıldırım, B. O. (2007). *Ortodontik tellerin farklı ortamlardaki korozyon davranışlarının incelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi
- Kwon, S. R., & Wertz, P. W. (2015). Review of the mechanism of tooth whitening. *J Esthet Restor Dent* 27(5), 240-257. <https://doi.org/10.1111/jerd.12152>
- Leong, D., Chai, J., Lautenschlager, E., & Gilbert, J. (1994). Marginal fit of machine-milled titanium and cast titanium single crowns. *Int J Prosthodont*, 7(5).
- Li, K., Chen, S., Wang, J., Xiao, X., Song, Z., & Liu, S. (2024). Tooth whitening: current status and prospects. *Odontology*, 112(3), 700-710. <https://doi.org/10.1007/s10266-024-00914-4>
- Li, Y., & Greenwall, L. (2013). Safety issues of tooth whitening using peroxide-based materials. *Br Dent J*, 215(1), 29-34. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.629>
- Luft, S., Keilig, L., Jäger, A., & Bourauel, C. (2009). In-vitro evaluation of the corrosion behavior of orthodontic brackets. *Orthod Craniofac Res*, 12(1), 43-51. <https://doi.org/10.1111/j.1601-6343.2008.01436.x>
- Lunardi, N., & Correr, A.-B. (2014). Spectrophotometric evaluation of dental bleaching under orthodontic bracket in enamel and dentin. *J Clin Exp Dent* 6(4), e321 –e326. <https://doi.org/10.4317/jced.51168>
- Macpherson, L., Stephen, K., Joiner, A., Schäfer, F., & Huntington, E. (2000). Comparison of a conventional and modified tooth stain index. *J Clin Periodontol*, 27(11), 854-859. <https://doi.org/10.1034/j.1600-051x.2000.027011854.x>
- Maijer, R., & Smith, D. (1986). Biodegradation of the orthodontic bracket system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 90(3), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(86\)90065-x](https://doi.org/10.1016/0889-5406(86)90065-x)
- Maijer, R., & Smith, D. C. (1986). Biodegradation of the orthodontic bracket system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 90(3), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(86\)90065-x](https://doi.org/10.1016/0889-5406(86)90065-x)
- Malcangi, G., Patano, A., Inchingolo, A. D., Ciocia, A. M., Piras, F., Latini, G., Di Pede, C., Palmieri, G., Laudadio, C., & Settanni, V. (2023). Efficacy of carbamide and hydrogen peroxide tooth bleaching techniques in orthodontic and restorative dentistry patients: A scoping review. *Appl Sci*, 13(12), 7089. <https://doi.org/10.3390/app13127089>
- Maran, B. M., de Paris Matos, T., de Castro, A. d. S., Vochikovski, L., Amadori, A. L., Loguercio, A. D., Reis, A., & Berger, S. B. (2020). In-office bleaching with low/medium vs. high concentrate hydrogen peroxide: A systematic review and meta-analysis. *Dent J*, 103, 103499. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103499>
- Matis, B. A., Mousa, H. N., Cochran, M. A., & Eckert, G. J. (2000). Clinical evaluation of bleaching agents of different concentrations. *Quintessence Int*, 31(5), 303–310.
- Matos de Souza, R., & Macedo de Menezes, L. (2008). Nickel, chromium and iron levels in the saliva of patients with simulated fixed orthodontic appliances. *Angle Orthod*, 78(2), 345-350. <https://doi.org/10.2319/111806-466.1>
- Mccaslin, A. J., Haywood, V. B., Potter, B. J., Dickinson, G. L., & Russell, C. M. (1999). Assessing dentin color changes from nightguard vital bleaching. *J Am Dent Assoc*, 130(10), 1485-1490. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1999.0061>

- McKay, G. C., Macnair, R., MacDonald, C., & Grant, M. H. (1996). Interactions of orthopaedic metals with an immortalized rat osteoblast cell line. *Biomaterials*, 17(13), 1339-1344. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8805983>
- Menezes, L. M., Quintao, C. A., & Bolognese, A. M. (2007). Urinary excretion levels of nickel in orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 131(5), 635-638. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.07.022>
- Michelberger, D., 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. <https://doi.org/10.1067/mod.2000.105529>
- Mikulewicz, M., Chojnacka, K., Woźniak, B., & Downarowicz, P. (2012). Release of metal ions from orthodontic appliances: an in vitro study. *Biol Trace Elem Res*, 146, 272-280. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9233-4>
- Moore, M., Harrington, E., & Rock, W. (2004). Factors affecting friction in the pre-adjusted appliance. *Eur J Orthod*, 26(6), 579-583. <https://doi.org/10.1093/ejo/26.6.579>
- Muia P. (1983). Paul Muia explains his four dimensional tooth color system. *Quintessence of dental technology*, 7(1), 57-62.
- Muller, K., & Valentine-Thon, E. (2006). Hypersensitivity to titanium: clinical and laboratory evidence. *Neuro Endocrinol Lett*, 27(1), 31-35.
- Naidu, A., Bennani, V., Brunton, J. M., & Brunton, P. (2020). Over-the-counter tooth whitening agents: a review of literature. *Braz Dent J*, 31, 221-235. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202003227>
- Nair, S. V., Padmanabhan, R., & Janardhanam, P. (2012). Evaluation of the effect of bracket and archwire composition on frictional forces in the buccal segments. *Indian J Dent Res*, 23(2), 203-208. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.100426>
- Nathoo, S. A. (1997). The chemistry and mechanisms of extrinsic and intrinsic discoloration. *J Am Dent Assoc*, 128, 6S-10S. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1997.0428>
- Nayak, R. S., Khanna, B., Pasha, A., Vinay, K., Narayan, A., & Chaitra, K. (2015). Evaluation of nickel and chromium ion release during fixed orthodontic treatment using inductively coupled plasma-mass spectrometer: an in vivo study. *J Int Oral Health*, 7(8), 14-20.
- Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *J Mech Behav Biomed Mater*, 1(1), 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.07.001>
- Noble, J., Ahing, S., Karaiskos, N., & Wiltshire, W. (2008). Nickel allergy and orthodontics, a review and report of two cases. *Br Dent J*, 204(6), 297-300. <https://doi.org/10.1038/bdj.2008.198>
- National Toxicology Program (NTP). (2024). *Cadmium and cadmium compounds*. <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/profiles/cadmium.pdf>
- Odioso, L., Gibb, R., & Gerlach, R. (2000). Impact of demographic, behavioral, and dental care utilization parameters on tooth color and personal satisfaction. *Compend Contin Educ Dent (Jamesburg, NJ: 1995)*. Supplement(29), S35-S43.
- Oh, K.-T., Choo, S.-U., Kim, K.-M., & Kim, K.-N. (2005). A stainless steel bracket for orthodontic application. *Eur J Orthod*, 27(3), 237-244. <https://doi.org/10.1093/ejo/cji005>
- Ortiz, A. J., Fernández, E., Vicente, A., Calvo, J. L., & Ortiz, C. (2011). Metallic ions released from stainless steel, nickel-free, and titanium orthodontic alloys: toxicity and DNA damage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 140(3), e115-e122. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.02.021>

- Öncağ, G., Yetkiner, E., & Mutlu, E. (2011). The use of fixed appliances in Turkey: A survey of specialist orthodontists. *EU Dişhek Fak Derg*, 32(2), 83-89.
- Özkalaycı, N., & Çiçek, O. (2018). Ortodontik Braketler; Bölüm I. *J. Dent. Sci.* (3), 125-133.
- Park, H., & Shearer, T. (1983). In vitro release of nickel and chromium from simulated orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 84(2), 156-159. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(83\)90180-x](https://doi.org/10.1016/0002-9416(83)90180-x)
- Paudel, S., Kumar, S., & Mallik, A. (2021). Atomic absorption spectroscopy: a short review. *EPRA International Journal of Research & Development (IJRD)*, 6(9), 322-327.
- Pazzini, C. A., Júnior, G. O., Marques, L. S., Pereira, C. V., & Pereira, L. J. (2009). Prevalence of nickel allergy and longitudinal evaluation of periodontal abnormalities in orthodontic allergic patients. *Angle Orthod*, 79(5), 922-927. <https://doi.org/10.2319/081408-430.1>
- Pelepenko, L. E., Marciano, M. A., Francati, T. M., Bombarda, G., Bessa Marconato Antunes, T., Sorrentino, F., Martin, R. A., Boanini, E., Cooper, P. R., & Shelton, R. M. (2022). Can strontium replace calcium in bioactive materials for dental applications? *J Biomed Mater Res Part A*, 110(12), 1892-1911. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37421>
- Penarrieta-Juanito, G., Sordi, M. B., Henriques, B., Dotto, M. E., Teughels, W., Silva, F. S., Magini, R. S., & Souza, J. C. (2019). Surface damage of dental implant systems and ions release after exposure to fluoride and hydrogen peroxide. *J Periodontal Res*, 54(1), 46-52. <https://doi.org/10.1111/jre.12603>
- Platt, J. A., Guzman, A., Zuccari, A., Thornburg, D. W., Rhodes, B. F., Oshida, Y., & Moore, B. K. (1997). Corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 112(1), 69-79. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(97\)70276-2](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(97)70276-2)
- Qualtrough, A., & Burke, F. (1994). A look at dental esthetics. *Quintessence Int*, 25(1), 7-14.
- Reimann, S., Bourauel, C., Weber, A., Dirk, C., & Lietz, T. (2016). Friction behavior of ceramic injection-molded (CIM) brackets. *J Orofac Orthop* 77(4), 262-271. <https://doi.org/10.1007/s00056-016-0030-8>
- Resano, M., Aramendía, M., & Belarra, M. A. (2014). High-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for direct analysis of solid samples and complex materials: a tutorial review. *J Anal At Spectrom*, 29(12), 2229-2250. <https://doi.org/10.1039/C4JA00176A>
- Rondelli, G., & Vicentini, B. (1999). Localized corrosion behaviour in simulated human body fluids of commercial Ni-Ti orthodontic wires. *Biomaterials*, 20(8), 785-792. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(98\)90233-2](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(98)90233-2)
- Sardarian, A., Abbasi, F., & Pakniyat Jahromi, M. (2023). Ion Release from Stainless Steel Brackets Subjected to Tooth Bleaching Treatment. *J Dent (Shiraz)*, 24(3), 342-347. <https://doi.org/10.30476/dentjods.2022.95210.1854>
- Sarrett, D. C. (2002). Tooth whitening today. *J Am Dent Assoc*, 133(11), 1535-1538. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2002.0085>
- Schiff, N., Dalard, F., Lissac, M., Morgon, L., & Grosgeat, B. (2005). Corrosion resistance of three orthodontic brackets: a comparative study of three fluoride mouthwashes. *Eur J Orthod*, 27(6), 541-549. <https://doi.org/10.1093/ejo/cji050>
- Schuttelaar, M. L., Ofenloch, R. F., Bruze, M., Cazzaniga, S., Elsner, P., Gonçalo, M., Naldi, L., Svensson, Å., & Diepgen, T. L. (2018). Prevalence of contact allergy to metals in the European general population with a focus on nickel and piercings: The EDEN Fragrance Study. *Contact dermatitis*, 79(1), 1-9. <https://doi.org/10.1111/cod.12983>

- Schwaninger, B., Sarkar, N. K., & Foster, B. E. (1982). Effect of long-term immersion corrosion on the flexural properties of nitinol. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 82(1), 45-49. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(82\)90545-0](https://doi.org/10.1016/0002-9416(82)90545-0)
- Sernetz, F. (1997). Biocompatibility of metallic orthodontic appliances. *Mater Ortod Biocompat*, 7, 4-24.
- Sfondrini, M. F., Cacciafesta, V., Maffia, E., Scribante, A., Alberti, G., Biesuz, R., & Klersy, C. (2010). Nickel release from new conventional stainless steel, recycled, and nickel-free orthodontic brackets: An in vitro study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 137(6), 809-815. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.07.021>
- Shahabi, S., Assadian, H., Nahavandi, A. M., & Nokhbatolfoghahaei, H. (2017). Comparison of tooth color change after bleaching with conventional and different light-activated methods. *Lasers Med Sci*, 9(1), 27-31. <https://doi.org/10.15171/jlms.2018.07>
- Siargos, B., Bradley, T. G., Darabara, M., Papadimitriou, G., & Zinelis, S. (2007). Galvanic Corrosion of Metal Injection Molded (MIM) and Conventional Brackets with Nickel-Titanium and Copper; chNickel-Titanium Archwires. *Angle Orthod*, 77(2), 355-360. [https://doi.org/10.2319/0003-3219\(2007\)077\[0355:GCOMIM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2319/0003-3219(2007)077[0355:GCOMIM]2.0.CO;2)
- Silverman, E., Cohen, M., & Gwinnett, A. (1979). Dr. Elliott Silverman, Dr. Morton Cohen, Dr. AJ Gwinnett on bonding. *J Clin Orthod*, 13(4), 236-251.
- Simonsen, A. B., Deleuran, M., Johansen, J. D., & Sommerlund, M. (2011). Contact allergy and allergic contact dermatitis in children—a review of current data. *Contact dermatitis*, 65(5), 254-265. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.2011.01963.x>
- Slack, M. E., Swift Jr, E. J., Rossouw, P. E., & Phillips, C. (2013). Tooth whitening in the orthodontic practice: A survey of orthodontists. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 143(4), S64-S71. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2012.06.017>
- Slezak, B., Santarpia, P., Xu, T., Monsul-Barnes, V., Heu, R. T., Stranick, M., Sullivan, R., Petrou, I., Bagley, D., & Li, Y. (2002). Safety profile of a new liquid whitening gel. *Compend Contin Educ Dent (Jamesburg, NJ: 1995)*, 23(11 Suppl 1), 4-11.
- Small, H., Stevens, T. S., & Bauman, W. C. (1975). Novel ion exchange chromatographic method using conductimetric detection. *Analyt Chem*, 47(11), 1801-1809. <https://doi.org/10.1021/ac60361a017>
- Spalj, S., Zrinski, M. M., Spalj, V. T., & Buljan, Z. I. (2012). In-vitro assessment of oxidative stress generated by orthodontic archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 141(5), 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.11.020>
- Staffolani, N., Damiani, F., Lilli, C., Guerra, M., Staffolani, N. J., Belcastro, S., & Locci, P. (1999). Ion release from orthodontic appliances. *J Dent*, 27(6), 449-454. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(98\)00073-6](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(98)00073-6)
- Sugito, S. (2022). Uji Kinerja Instrumen Spektrofotometer Serapan Atom (AAS) Shimadzu 6650 F Terhadap Logam Fe, Zn pada Kegiatan Praktikum Kimia Anorganik di UPT Laboratorium Terpadu UNS. *Indones J Lab*, 5(2), 83-89.
- Suharno, B., Ferdian, D., Saputro, H. R., Suharno, L. P., Baek, E. R., & Supriadi, S. (2017). Vacuum sintering process in metal injection molding for 17-4 ph stainless steel as material for orthodontic bracket. *Solid State Phenomena*, 266, 231-237. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.266.231>
- Sulieman, M. (2004). An overview of bleaching techniques: 1. History, chemistry, safety and legal aspects. *Dent. Update*, 31(10), 608-616. <https://doi.org/10.12968/denu.2004.31.10.608>

- Sulieman, M., Addy, M., Macdonald, E., & Rees, J. (2005). The bleaching depth of a 35% hydrogen peroxide based in-office product: a study in vitro. *Dent J*, 33(1), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2004.07.008>
- Sundfeld, R. H., Machado, L. S., de Oliveira, F. G., Santos, E. A., Lugato, I. C. P. T., & Neto, D. S. (2012). Conservative reconstruction of the smile by orthodontic, bleaching, and restorative procedures. *Eur J Dent* 6(01), 105-109. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1698938>
- Sutil, E., da Silva, K. L., Terra, R. M. O., Burey, A., Rezende, M., Reis, A., & Loguercio, A. D. (2022). Effectiveness and adverse effects of at-home dental bleaching with 37% versus 10% carbamide peroxide: A randomized, blind clinical trial. *J Esthet Restor Dent* 34(2), 313-321. <https://doi.org/10.1111/jerd.12677>
- Swartz, M. L. (1988). Ceramic brackets. *J Clin Orthod*, 22(2), 82-88.
- Syed, M., Chopra, R., & Sachdev, V. (2015). Allergic reactions to dental materials-a systematic review. *J Clin Diagn Res*, 9(10), ZE04-ZE9. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2015/15640.6589>
- Tamai, K., Mitsumori, M., Fujishiro, S., Kokubo, M., Ooya, N., Nagata, Y., Sasai, K., Hiraoka, M., & Inamoto, T. (2001). A case of allergic reaction to surgical metal clips inserted for postoperative boost irradiation in a patient undergoing breast-conserving therapy. *Breast Cancer*, 8, 90-92. <https://doi.org/10.1007/BF02967485>
- Ten Bosch, J., & Coops, J. (1995). Tooth color and reflectance as related to light scattering and enamel hardness. *J. Dent. Res.*, 74(1), 374-380. <https://doi.org/10.1177/00220345950740011401>
- Tezcan, M. (2014). *Farklı braket ve ligasyon tiplerinin tükürükteki nikel ve krom iyon seviyeleri üzerine etkilerinin değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- Thitinthapan, W., Satamanont, P., & Vongsavan, N. (1999). In vitro penetration of the pulp chamber by three brands of carbamide peroxide. *J Esthet Restor Dent* 11(5), 259-264. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.1999.tb00407.x>
- Tosun, Y. (1999). *Biyomekanik: sabit ortodontik apareylerin prensipleri*. Ege Üniversitesi Yayınları.
- Toumelin-Chemla, F., Rouelle, F., & Burdairon, G. (1996). Corrosive properties of fluoride-containing odontologic gels against titanium. *Dent J*, 24(1-2), 109-115. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(95\)00033-x](https://doi.org/10.1016/0300-5712(95)00033-x)
- Trakyalı, G., Özdemir, F. I., & Arun, T. (2009). Enamel colour changes at debonding and after finishing procedures using five different adhesives. *Eur J Orthod*, 31(4), 397-401. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjp023>
- Tswett, M. (1906). 51. M. Tswett: Physikalisch-chemische Studien über das Chlorophyll. Die Adsorptionen. *Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft*, 24(6), 316-323. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1906.tb06524.x>
- Valentine-Thon, E., & Schiwara, H.-W. (2003). Validity of MELISA® for metal sensitivity testing. *Neuro Endocrinol. Lett.*, 24(1/2), 57-64.
- Velasco-Ibanez, R., Lara-Carrillo, E., Morales-Luckie, R. A., Romero-Guzman, E. T., Toral-Rizo, V. H., Ramirez-Cardona, M., Garcia-Hernandez, V., & Medina-Solis, C. E. (2020). Evaluation of the release of nickel and titanium under orthodontic treatment. *Sci Rep*, 10(1), 22280. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79221-1>
- von Fraunhofer, J. A. (1997). Corrosion of orthodontic devices. *Semin Orthod*, 3(3), 198-205. [https://doi.org/10.1016/s1073-8746\(97\)80070-9](https://doi.org/10.1016/s1073-8746(97)80070-9)

- Wataha, J. C., Hanks, C. T., & Craig, R. G. (1994). In vitro effect of metal ions on cellular metabolism and the correlation between these effects and the uptake of the ions. *J Biomed Mater Res*, 28(4), 427-433. <https://doi.org/10.1002/jbm.820280404>
- Watts, A., & Addy, M. (2001). Tooth discolouration and staining: a review of the literature. *Br Dent J*, 190(6), 309–316. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4800959>
- Westland, S. (2003). Review of the CIE system of colorimetry and its use in dentistry. *J Esthet Restor Dent* 15, S5-S12. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2003.tb00313.x>
- White, D., Kozak, K., Zoladz, J., Duschner, H., & Götz, H. (2000). Effects of tooth-whitening gels on enamel and dentin ultrastructure--a confocal laser scanning microscopy pilot study. *Compend Contin Educ Dent (Jamesburg, NJ: 1995). Supplement*(29), S29-34; quiz S43.
- World Health Organization (WHO). (2020). *International chemical safety cards: cadmium*. <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0020.htm>
- Zinelis, S., Annousaki, O., Makou, M., & Eliades, T. (2005). Metallurgical characterization of orthodontic brackets produced by metal injection molding (MIM). *Angle Orthod*, 75(6), 1024-1031. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(2005\)75\[1024:MCOOBP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(2005)75[1024:MCOOBP]2.0.CO;2)