

**BEZMİALEM VAKIF ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ**

**ŞEFFAF PLAKLARLA ÜST MOLAR EKSPANSİYONUNDA FARKLI
ATAŞMAN TASARIMLARININ ETKİSİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU
ELEMENLAR ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

UZMANLIK TEZİ

İrem ŞENSOY

Ortodonti Anabilim Dalı

Ortodonti Uzmanlık Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Banu KILIÇ

AĞUSTOS 2025

BEZMİALEM VAKIF ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

ŞEFFAF PLAKLARLA ÜST MOLAR EKSPANSİYONUNDA FARKLI
ATAŞMAN TASARIMLARININ ETKİSİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU
ELEMENLAR ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

UZMANLIK TEZİ

İrem ŞENSOY

Ortodonti Anabilim Dalı

Ortodonti Uzmanlık Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Banu KILIÇ

AĞUSTOS 2025

ÖNSÖZ

Uzmanlık eğitimim süresince desteğini esirgemeyen, bilgilerini benimle her zaman paylaştan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Banu KILIÇ'a,

Bilgi ve birikimleriyle bana yol gösteren, bu zorlu süreçte desteğini esirgemeyen anabilim dalı başkanımız Prof. Dr. Gökmen KURT'a,

Bilgi ve tecrübeleriyle uzmanlık eğitimimde emeği geçen değerli hocalarım Prof. Dr. Nazan KÜÇÜKKELEŞ, Doç. Dr. Berza YILMAZ, Doç. Dr. Elif Dilara ARSLAN, Dr. Öğr. Üyesi Şerife ŞAHİN ve Dr. Öğr. Üyesi Nihal KAYA'ya,

Tez çalışmamın teknik kısmı ile sabır ve titizlikle ilgilenen Tinus Mühendislik üyesi Kaan YARDIMCI'ya,

Hayatım boyunca bana verdikleri maddi ve manevi destekleriyle başarılı ve cesur adımlar atmamı sağlayan, her zaman yanımda olan, hayatımın en büyük şansı olan; annem Yeşim ŞENSOY, babam Mehmet Gökhan ŞENSOY ve kardeşim Göker ŞENSOY'a,

Bu zorlu süreci en güzel anı ve paylaşımlarla tamamlamamı sağlayan, burada kurduğumuz dostluğun bu sürecin sonunda da devam edeceğini bildiğim kıymetli eş kızımlarım Meriç ARSLAN, Ahsen İrem TOKTAŞ ve Fatma DERİN ALPAYDIN'a,

Bu süreçte karşıma çıkan tüm olumsuzluklara sabırla çözüm üreten ve her zaman yanımda olduğunu bildiğim en büyük destekçim Gökberk SERT'e,

Sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2025

İrem ŞENSOY
Diş Hekimi

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

İrem ŞENSOY



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iv
BEYAN.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
TABLO LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Maksillanın Büyüme ve Gelişimi	3
2.2 Maksiller Transversal Darlık.....	4
2.2.1 Tanım, insidans ve etiyoloji	4
2.2.2 Teşhis yöntemleri	6
2.2.3 Maksiller darlık tedavi yöntemleri	11
2.3 Ortodontide Diş Hareketi Mekanizmaları	21
2.3.1 Ortodontide diş hareketi	21
2.3.2 Ortodontide diş hareketi tipleri	22
2.4 Şeffaf Plak Tedavileri	28
2.4.1 Tarihçe	28
2.4.2 Şeffaf plak tedavi sistemleri.....	29
2.4.3 Şeffaf plak tedavi aşamaları	30
2.4.4 Şeffaf plakların materyal özellikleri.....	32
2.4.5 Şeffaf plaklar ile sabit ortodontik tedavinin karşılaştırılması	33
2.4.6 Endikasyonlar ve kontrendikasyonlar	35
2.4.7 Avantajlar ve dezavantajlar	36
2.4.8 Ataşmanlar	37
2.5 Sonlu Elemanlar Analizi	39
2.5.1 Sonlu elemanlar analizi ile ilgili kavramlar	40
2.5.2 Sonlu elemanlar analiz yönteminin avantajları	44
2.5.3 Sonlu elemanlar analiz yönteminin dezavantajları	44
2.5.4 Sonlu elemanlar analiz yönteminin aşamaları.....	45
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	48
3.1 Dahil Edilme Kriterleri	48
3.2 Dışlanma Kriterleri	48
3.3 Geometrik Modellerin Oluşturulması	49
3.3.1 Kortikal kemik, trabeküler kemik ve mukozanın modellenmesi	50

3.3.2 Şeffaf plak ve ataşmanların modellenmesi ve çalışma modellerinin oluşturulması	51
3.4 Matematiksel Modellerin Oluşturulması.....	57
3.5 Kullanılan Materyal Özellikleri	58
3.6 Kuantitatif Model Bilgileri.....	58
3.7 Yükleme Senaryoları ve Sınır Koşulları	59
3.8 Sistemlerin Birleştirilmesi ve Parçalar Arası Bağlantı Durumu	62
4. BULGULAR.....	63
4.1 Grupların X-Y-Z Ekseninde ve Total Yer Değiştirme Miktarları	63
4.1.1 Kontrol grubu	63
4.1.2 Grup 1	67
4.1.3 Grup 2	72
4.1.4 Grup 3	76
4.1.5 Grup 4	80
4.1.6 Grup 5	85
4.1.7 Grup 6	89
4.1.8 Şeffaf plağa ait deformasyon değerleri	94
4.2 Dişlerin ve Periodontal Ligamentin Von Mises, Maksimum Principal ve Minimum Principal Stres Değerleri	96
4.2.1 Dişlere ait von mises stres değerleri.....	96
4.2.2 PDL'ye ait maksimum ve minimum principal stres değerleri	97
5. TARTIŞMA	106
5.1 Amaç	106
5.2 Materyal Metod.....	109
5.2.1 Analiz modelinin oluşturulması	109
5.2.2 Grupların oluşturulması	109
5.2.3 Ataşman boyutları	110
5.2.4 Şeffaf plak kalınlığı ve gingival sınırları	111
5.2.5 Plak aktivasyon miktarı.....	112
5.3 Bulgular.....	114
5.3.1 Yer değiştirme.....	114
5.3.2 Von mises, maximum principal ve minimum principal stres değerleri ..	122
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	124
KAYNAKLAR	126
EKLER.....	140
ÖZGEÇMİŞ.....	141

KISALTMALAR

3D	: Üç boyutlu
ABO	: American Board of Orthodontics (Amerikan Ortodonti Kurulu)
Ag-Ag	: Sağ ve sol antegonial çentik mesafesi
BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
CAD	: Bilgisayar Destekli Yazılım (Computer Aided Design)
CBCT	: Cone-beam Computed Tomografi
DICOM	: Digital Imaging and Communications in Medicine
FEM	: Finite Element Method
gf	: Gram-kuvvet
HU	: Hounsfield unit
J-J	: Sağ ve sol jugale mesafesi
kg	: Kilogram
kgf	: Kilogram-kuvvet
MIMICS	: Materialise's Interactive Medical Image Control System
Hyrax	: Hygienic Appliance for Rapid Expansion
MARPE	: Minivida Destekli Hızlı Maksiller Ekspansiyon
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
M/F	: Moment/kuvvet
N	: Newton
OGS	: Objective Grading System (Objektif Derecelendirme Sistemi)
P	: Pascal
PA	: Posteoanterior
PAK	: Posterior Açık Kapanış
PET	: Polietilen Tereftalat
PET-G	: Polietilen Tereftalat Glikol
Pmax	: Maksimum Asal Gerilme
Pmin	: Minimum Asal Gerilme
PDL	: Periodontal ligament
RME	: Hızlı Maksiller Genişletme
S	: Maksiller dört kesici dişin meziodistal genişlik toplamı
SARME	: Cerrahi Destekli Hızlı Üst Çene Genişletmesi
SME	: Yavaş Maksiller Ekspansiyon
STL	: Stereolitografinin
ŞPT	: Şeffaf Plak Tedavisi

SEMBOLLER

° : Derece
% : Yüzde



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Çalışma modelleri	53
Tablo 3.2: Analizde kullanılan malzemelerin Young's modülü ve poisson oranı değerleri.	58
Tablo 3.3: Analizde kullanılan modellerin kuantitatif model bilgileri.....	59
Tablo 3.4: Dişlerin hareket miktarlarının değerlendirildiği referans noktaları.	61
Tablo 4.1: Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.	63
Tablo 4.1 (devamı): Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.	64
Tablo 4.1 (devamı): Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.	65
Tablo 4.2: Birinci gruba ait diş hareketi değerleri.	68
Tablo 4.2 (devamı): Birinci gruba ait diş hareketi değerleri.	69
Tablo 4.3: İkinci gruba ait diş hareketi değerleri.	72
Tablo 4.3 (devamı): İkinci gruba ait diş hareketi değerleri.	73
Tablo 4.4: Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.	76
Tablo 4.4 (devamı): Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.	77
Tablo 4.4 (devamı): Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.	78
Tablo 4.5: Dördüncü gruba ait diş hareketi değerleri.....	81
Tablo 4.5 (devamı): Dördüncü gruba ait diş hareketi değerleri.	82
Tablo 4.6: Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.....	85
Tablo 4.6 (devamı): Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.	86
Tablo 4.6 (devamı): Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.	87
Tablo 4.7: Altıncı gruba ait diş hareketi değerleri.	90
Tablo 4.7 (devamı): Altıncı gruba ait diş hareketi değerleri.	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Derin kapanış düzeltiminde SmartForce plak aktivasyonu	19
Şekil 2.2: SmartForce plak aktivasyonu	20
Şekil 2.3: Optimize ekspansiyon destek ataşmanı ve bukkal kök torkunun molar diş uygulanması	20
Şekil 2.4: Posterior ark ekspansiyonunda SmartForce plak aktivasyonu	21
Şekil 2.5: Sabit mekanikler ile keser diş palatinal kök torkunun uygulanması	27
Şekil 2.6: Şeffaf plaklarda power ridge uygulanması.....	27
Şekil 3.1: Hastaya ait DICOM verilerinin görünümü.....	49
Şekil 3.2: Üst çene kemik modeli	50
Şekil 3.3: Üst çene dişlerinin ve periodontal ligamentlerin modeli	50
Şekil 3.4: Üst çene kemik, diş, periodontal ligament ve mukoza modeli.....	50
Şekil 3.5: Şeffaf plak modeli.	51
Şekil 3.6: Horizontal dikdörtgen ataşman modeli.	51
Şekil 3.7: Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman modeli.	52
Şekil 3.8: Okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman modeli.	52
Şekil 3.9: 24, 25 ve 26 numaralı dişlerinde optimize ekspansiyon destek ataşmanı bulunan hastanın 3D intraoral tarama görüntüsü.	52
Şekil 3.10: Molar ve premolar dişlere uygulanan optimize ekspansiyon destek ataşmanı modeli	52
Şekil 3.11: Kontrol grubuna ait model.	54
Şekil 3.12: Grup 1'e ait model.....	54
Şekil 3.13: Grup 2'ye ait model.....	55
Şekil 3.14: Grup 3'e ait model.....	55
Şekil 3.15: Grup 4'e ait model.....	55
Şekil 3.16: Grup 4'e ait modelin palatinal görüntüsü.....	56
Şekil 3.17: Grup 5'e ait model.....	56
Şekil 3.18: Grup 5'e ait modelin palatinal görüntüsü.....	56
Şekil 3.19: Grup 6'ya ait model.....	57
Şekil 3.20: Grup 6'ya ait modelin palatinal görüntüsü.....	57
Şekil 3.21: Analizin gerçekleştirileceği matematiksel model.....	58
Şekil 3.22: Ekspansiyonun tersi yönde uygulanan diş hareketi.....	60
Şekil 3.23: Hesaplanan reaksiyon kuvvetlerinin uygulandığı diş ve şeffaf plak temas arayüzü.	60
Şekil 3.24: Sınır koşulları	61
Şekil 4.1: Kontrol grubunda X eksenindeki yer değiştirme miktarları.....	66
Şekil 4.2: Kontrol grubunda Y eksenindeki yer değiştirme miktarları.....	66
Şekil 4.3: Kontrol grubunda Z eksenindeki yer değiştirme miktarları.	67
Şekil 4.4: Kontrol grubunda total yer değiştirme miktarları.	67
Şekil 4.5: Birinci grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.	70
Şekil 4.6: Birinci grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.	70
Şekil 4.7: Birinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	71
Şekil 4.8: Birinci grupta total yer değiştirme miktarları.....	71
Şekil 4.9: İkinci grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.....	74
Şekil 4.10: İkinci grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.....	75

Şekil 4.11: İkinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	75
Şekil 4.12: İkinci grupta total yer değiştirme miktarları.	76
Şekil 4.13: Üçüncü grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.	79
Şekil 4.14: Üçüncü grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.	79
Şekil 4.15: Üçüncü grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	80
Şekil 4.16: Üçüncü grupta total yer değiştirme miktarları.	80
Şekil 4.17: Dördüncü grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.	83
Şekil 4.18: Dördüncü grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.	84
Şekil 4.19: Dördüncü grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	84
Şekil 4.20: Dördüncü grupta total yer değiştirme miktarları.	85
Şekil 4.21: Beşinci grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.	88
Şekil 4.22: Beşinci grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.	88
Şekil 4.23: Beşinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	89
Şekil 4.24: Beşinci grupta total yer değiştirme miktarları.	89
Şekil 4.25: Altıncı grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.	92
Şekil 4.26: Altıncı grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.	92
Şekil 4.27: Altıncı grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.	93
Şekil 4.28: Altıncı grupta total yer değiştirme miktarları.	93
Şekil 4.29: Kontrol grubunda şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	94
Şekil 4.30: Grup 1'deki şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	94
Şekil 4.31: Grup 2'de şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	95
Şekil 4.32: Grup 3'te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	95
Şekil 4.33: Grup 4'te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	95
Şekil 4.34: Grup 5'te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	96
Şekil 4.35: Grup 6'da şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.	96
Şekil 4.36: Kontrol grubuna ait Von Mises değerleri.	98
Şekil 4.37: Kontrol grubuna ait maksimum principal değerleri.	98
Şekil 4.38: Kontrol grubuna ait minimum principal değerleri.	99
Şekil 4.39: Grup 1'e ait Von Mises değerleri.	99
Şekil 4.40: Grup 1'e ait maksimum principal değerleri.	99
Şekil 4.41: Grup 1'e ait minimum principal değerleri.	100
Şekil 4.42: Grup 2'ye ait Von Mises değerleri.	100
Şekil 4.43: Grup 2'ye ait maksimum principal değerleri.	100
Şekil 4.44: Grup 2'ye ait minimum principal değerleri.	101
Şekil 4.45: Grup 3'e ait Von Mises değerleri.	101
Şekil 4.46: Grup 3'e ait maksimum principal değerleri.	101
Şekil 4.47: Grup 3'e ait minimum principal değerleri.	102
Şekil 4.48: Grup 4'e ait Von Mises değerleri.	102
Şekil 4.49: Grup 4'e ait maksimum principal değerleri.	102
Şekil 4.47: Grup 4'e ait maksimum principal değerleri.	103
Şekil 4.48: Grup 5'e ait Von Mises değerleri.	103
Şekil 4.49: Grup 5'e ait maksimum principal değerleri.	103
Şekil 4.50: Grup 5'e ait minimum principal değerleri.	104
Şekil 4.51: Grup 6'ya ait Von Mises değerleri.	104
Şekil 4.52: Grup 6'ya ait maksimum principal değerleri.	104
Şekil 4.53: Grup 6'ya ait minimum principal değerleri.	105

ŞEFFAF PLAKLARLA ÜST MOLAR EKSPANSİYONUNDA FARKLI ATAŞMAN TASARIMLARININ ETKİSİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Son yıllarda estetik ve hasta konforu açısından sağladığı avantajlar nedeniyle şeffaf plaklarla ortodontik tedavi, hastalar tarafından tercih edilen bir tedavi yöntemi haline gelmiştir. Şeffaf plaklarla gerçekleştirilen dental ekspansiyon sırasında gerçekleşen devrilme hareketi ve yetersiz kök kontrolü gibi sınırlamalar, önemli biyomekanik problemler arasında yer almaktadır. Özellikle üst molar dişlerde paralel hareketin sağlanması, uzun dönem stabilite ve periodontal sağlık açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonlu elemanlar analizi veriler doğru girildiğinde gerçeğe yakın sonuçlar vermesi, invaziv olmaması gibi avantajları nedeniyle diş hekimliğinde ve ortodonti alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, şeffaf plaklarla yapılan maksiller molar ekspansiyonu sırasında kullanılan farklı ataşman tasarımlarının ve konumlarının etkilerini üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile değerlendirerek optimum yöntemi belirlemektir.

Çalışmamızda 20 yaşında erişkin bir hastada, ataşmansız kontrol grubu ile birlikte farklı ataşman konum ve konfigürasyonundan oluşan yedi farklı grupta, şeffaf plaklar ile ekspansiyon sırasında molar dişlerde ve periodontal yapılarda oluşan stres dağılımı ve yer değiştirme miktarları analiz edilmiştir. Bu gruplar; kontrol grubu, (1) bukkal yüzeye horizontal dikdörtgen ataşman uygulanması, (2) bukkal yüzeye gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman uygulanması, (3) bukkal yüzeye optimize ekspansiyon destek ataşmanı uygulanması, (4) optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak birinci moların palatinal yüzeyine okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman uygulanması, (5) optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak birinci moların palatinal yüzeyine horizontal dikdörtgen ataşman uygulanması, (6) bukkal yüzeye ataşman eklenmeden, birinci molar dişin palatinal yüzeyine horizontal dikdörtgen ataşman uygulanması olarak sınıflandırılmıştır. Tüm gruplarda 0.6 mm kalınlıkta şeffaf plaklar uygulanmıştır. Yükleme yönteminde, dişler 0.2 mm bukkal yönde hareket ettirildiğinde şeffaf plak geometrisinde gerçekleşen deformasyon hesaplanmış ve deformasyona bağlı oluşan temas kuvvetleri ilgili diş yüzeylerine ters yönde uygulanmıştır. Bu sayede, şeffaf plağın biyomekanik etkilerinin doğru şekilde yansıtılması ve klinik ortamla uyumlu sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tüm gruplarda ekspansiyonun, krunun bukkale ve kökün palatinal hareketi şeklinde gerçekleştiği ve paralel hareket sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Optimize ataşmanlar, konvansiyonel ataşmanlara kıyasla daha yüksek ekspansiyon etkinliği ve kök kontrolü göstermiştir. Bukkal optimize ataşman ile birlikte palatinal yüzeye yerleştirilen okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman kullanılan Grup 4'te, en yüksek ekspansiyon değeri, buna kıyasla en düşük kökün palatine hareketi tespit edilmiştir. Sadece palatinal yüzeye ataşman yerleştirilen Grup 6 ile kontrol grubu arasında hareket etkinliği açısından bir fark bulunamamıştır. Tüm gruplarda palatinal tüberküllerde ekstrüzyon izlenmiştir.

Elde edilen bulgular, ataşman tasarımı, yüzey yerleşimi ve ataşman açısının şeffaf plaklarla molar ekspansiyon etkinliği ve kök kontrolü üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Klinik uygulamalarda, bu değişkenlerin dikkate alınmasının, yan etkilerin azaltılması ve tedavi başarısının artırılması açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ataşman, ekspansiyon, sonlu elemanlar analizi, şeffaf plak



COMPARISON OF THE EFFECTS OF DIFFERENT ATTACHMENT DESIGNS IN MAXILLARY MOLAR EXPANSION WITH CLEAR ALIGNERS: A THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS METHOD

SUMMARY

In recent years, orthodontic treatment with clear aligners has become a preferred treatment method for patients due to the advantages it offers in terms of aesthetics and comfort. Limitations such as tipping movement and insufficient root control during dental expansion with clear aligners are among the significant biomechanical problems. Ensuring bodily movement, especially in upper molar teeth, is of great importance for long-term stability and periodontal health.

Finite element analysis is frequently used in dentistry and orthodontics due to its advantages such as providing realistic results when data is submitted correctly and being non-invasive. The aim of this study is to determine the optimal method by evaluating the effects of different attachment designs and positions used during maxillary molar expansion with clear aligners using three-dimensional finite element analysis.

In our study, the stress distribution and displacement amounts in the molar teeth and periodontal structures during expansion with clear aligners were analyzed in seven different groups consisting of different attachment positions and configurations, along with an attachment-free control group, in a 20-year-old adult patient. These groups were: control group, (1) horizontal rectangular attachment applied to the buccal surface, (2) gingivally beveled horizontal rectangular attachment applied to the buccal surface, (3) application of an optimized expansion support attachment to the buccal surface, (4) application of an occlusally beveled horizontal rectangular attachment to the palatal surface of the first molar in addition to the optimized expansion support attachment, (5) application of a horizontal rectangular attachment to the palatal surface of the first molar in addition to the optimized expansion support attachment, (6) application of a horizontal rectangular attachment to the palatal surface of the first molar without adding an attachment to the buccal surface. Clear aligners with a thickness of 0.6 mm were applied in all groups. In the loading method, the deformation occurring in the clear aligner geometry when the teeth were moved 0.2 mm in the palatal direction was calculated, and the contact forces resulting from the deformation were applied in the opposite direction to the relevant tooth surfaces. In this way, it was aimed to accurately reflect the biomechanical effects of the transparent plate and obtain results compatible with the clinical environment.

In all groups, expansion was observed to occur in the form of buccal movement of the crown and palatal movement of the root, and parallel movement could not be achieved. Optimized attachments showed higher expansion efficiency and root control compared

to conventional attachments. In Group 4, where an occlusal beveled horizontal rectangular attachment was placed on the palatal surface along with a buccal optimized attachment, the highest expansion value and the lowest palatal movement of the root were identified. No difference in movement efficiency was found between Group 6, where attachments were placed only on the palatal surface, and the control group. Extrusion was observed in the palatal cusp in all groups.

The findings demonstrate that attachment design, surface, and attachment angle have significant effects on the effectiveness of molar expansion and root control with clear aligners. In clinical practice, consideration of these variables is deemed beneficial for minimizing adverse effects and enhancing treatment success.

Keywords: Attachment, clear aligners, expansion, finite element analysis



1. GİRİŞ

Transversal yönde görülen diş ve bazal kaide uyumsuzlukları, malokluzyonların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durum estetik, fonksiyonel ve okluzal stabilite açısından problemlere yol açabilmektedir[1]. Transversal yön anomalilerinden olan maksiller darlık; posterior çapraz kapanış, daralmış dental ark, dental çapraşıklık, karanlık bukkal koridorlar ve solunum problemleri gibi çeşitli klinik problemlere neden olabilmektedir [2, 3].

Sabit apareylerle genişletme, geleneksel tedavi yaklaşımlarında maksiller darlığın tedavisi için geçmişten beri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu apareylerin dezavantajları arasında estetik kaygılar oluşturmaları, hijyen sağlamanın zor olması, ağrı, konuşma zorluğu ve günlük hayatı olumsuz etkileyecek olan hasta konforunun azalması bulunmaktadır [4]. Güncel bir tedavi protokolü olan şeffaf plaklar ise estetik, hasta konforu ve ağız hijyenini kolaylaştırma açısından önemli avantajlar sunan bir tedavi yöntemidir [5].

Şeffaf plaklar ile diş hareketleri gerçekleştirilirken kullanılan ataşman tasarımları, diş hareketinin verimliliği üzerinde etki göstermektedir. Farklı ataşman tasarımları, diş yüzeyine uygulanan kuvvetlerin etkili bir şekilde iletimini sağlayarak, ekspansiyonun biyomekanik başarısını etkilemektedir [6]

Literatürde sonlu elemanlar analizi; periodontal ligament, diş ve alveolar kemik gibi dokularda oluşan fizyolojik tepkilerle ilgili kantitatif veriler sağlayan noninvaziv bir yöntem olarak belirtilmektedir. Karmaşık yapıların stresini ve deformasyonunu hesaplamak için uygulanan bir mühendislik tekniği olan sonlu elemanlar analizi tıbbi ve ortodontik araştırmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Literatürde, şeffaf plak tedavilerinde farklı ataşman tasarımlarının maksiller molar dişlerdeki tork hareketinin etkinliğine etkisini inceleyen çalışma sayısı sınırlıdır. Bu durum, klinik uygulamalarda optimal ataşman tasarımının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle farklı ataşman tasarım ve konumlarının maksiller molar dişlerde tork hareketine etkisinin üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yöntemiyle incelenmesi, literatüre katkı sağlayarak klinik tedavi planlamalarında öngörü oluşturacaktır. Ayrıca, çalışmamızda planladığımız tüm mekanikleri karşılaştırmalı olarak inceleyen herhangi bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu uzmanlık tez

alışmasının amacı, şeffaf plaklarla posterior dişsel ekspansiyon uygulanan hastalarda, molar dişlerde en az yan etkiye neden olan optimum yöntemi belirleyerek, tedavi planlamalarının daha öngörülebilir hale getirilmesini sağlamaktır. Yedi farklı dişsel genişletme senaryosunun dişlerde ve periodontal ligamentte oluşturduğu stres dağılımı ile dişlerdeki yer değiştirme miktarı sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilerek, klinik uygulamalarda daha etkili tedavi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanması planlanmaktadır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Maksillanın Büyüme ve Gelişimi

Postnatal dönemde maksillanın kemikleşmesi intramembranöz ossifikasyon ile gerçekleşmektedir. Sutura palatina media kapanmadan önce maksilla sağ ve sol olmak üzere iki parça halindedir. İntramembranöz kemikleşmeye ek olarak suturalardaki kemik apozisyonu ve kemik yüzeylerindeki periostal aktivite maksillanın büyüme ve gelişiminde etkilidir [8].

Frontomaksiller sutur, zygomatikomaksiller sutur, zygomaticotemporal sutur ve pterygopalatin sutur maksillanın hem sagittal hem de vertikal yönde büyümesinde etkilidir. Bu suturların etkisiyle maksilla uzayda hem öne hem de aşağıya doğru yer değiştirmektedir [8].

Yaklaşık 6 yaşına kadar maksillanın ileri yöndeki büyümesinde kranial kaidenin etkisi büyüktür. 7 yaş civarında kranial kaide büyümesi durmaktadır ve maksillanın ileri yöndeki hareketinde asıl etken sutural büyüme olmaktadır. Suturaların her iki tarafında kemik apozisyonunun olmasının etkisiyle büyüme gerçekleşmektedir [9]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, sutural büyümenin bireyler arasında önemli farklılıklar gösterebildiğini ve büyüme paterninin yaş, cinsiyet ve genetik faktörler gibi değişkenlere bağlı olarak şekillenebildiğini ortaya koymuştur [10] Örneğin, cephe röntgenleri ve üç boyutlu görüntüleme teknikleri kullanılarak yapılan güncel araştırmalar, bazı bireylerde midpalatal suturun geç kapandığını ve bu durumun ortodontik genişletme prosedürlerinde avantaj sağlayabileceğini göstermektedir [11]. Bununla beraber bazı çalışmalarda, pubertal büyüme atılımının sutural aktivite üzerindeki etkisinin geleneksel görüşlerden farklı olabileceği ve genişletme tedavilerinde kişiselleştirilmiş yaklaşımların gerekliliğinin önemini belirten bulgular rapor edilmiştir [12].

Midpalatal sutur maturasyonunun başlangıcı ve ilerlemesi yaşa ve cinsiyete göre değişiklik göstermektedir [13]. Hansman, midpalatal suturun yaklaşık 6 yaşında kapanmaya başladığını belirtmiştir [14]. Cobb, fasiyal suturların ossifikasyonunun kranial suturlarla aynı anda başladığını ancak aynı derecede ilerlemediğini göstermiştir [15]. Person ve Thilander, kişiler arasında suturun kapanmaya başlangıç yaşı ve ilerlemesinde farklılıklar olduğunu belirtmiştir. Aynı suturun farklı

bölgelerinde farklı maturasyon düzeyleri belirlenmiştir. Literatürdeki veriler sadece yaştan sutur maturasyonunu etkilemediğini, yaştan farklı faktörlerin de sutur kapanmasını ve ilerlemesini etkilediğini göstermektedir [16].

2.2 Maksiller Transversal Darlık

2.2.1 Tanım, insidans ve etiyoloji

Maksillanın transversal yöndeki yetersizliği kraniyofasiyal bölgede görülen en yaygın iskeletsel problemlerden biri olarak kabul edilmektedir [3]. Maksiller transversal yetersizliği olan hastalar genellikle dar bir damak ve posterior çapraz kapanış ile karakterizedir [9]. Posterior çapraz kapanış, en az bir maksiller posterior dişin palatinal tüberkülünün mandibular posterior dişin santral fossası ile temas etmediği transversal uyumsuzluk olarak tanımlanmaktadır [17, 18]. Okeson posterior çapraz kapanışı, mandibular dişlerin lingual tüberküllerin maksiller dişlerin santral fossalarına, maksiller dişlerin bukkal tüberküllerin ise mandibular dişlerin santral fossalarına teması olarak tanımlamıştır [19]. Posterior çapraz kapanış değerlendirilirken malokluzyonun iskeletsel mi yoksa dental mi olduğu iyi analiz edilmelidir [9].

İskeletsel posterior çapraz kapanış, alt ve üst çene kemiklerinin genişliklerinin birbiriyle uyumlu olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, üst çene kemiğinin dar olması, alt kemiğinin geniş olması veya her iki durumun kombinasyonu olarak görülebilmektedir. İskeletsel posterior çapraz kapanışta alt çene hem istirahat hem kapanış durumunda aynı konumdadır [8].

Fonksiyonel posterior çapraz kapanışta, alt çene istirahat durumundayken alt ve üst molar dişler tüberkül tüberküle temas etmektedir. Ancak alt çene istirahat konumundan kapanış konumuna geçerken, erken temas nedeniyle kayarak kapanmaktadır ve posterior çapraz kapanış görülmektedir[8].

Üst ve alt çene kemiklerinin genişliği uyumlu olmasına rağmen, üst çenede bir veya bi grup dişin palatinalde konumlanması ile karakterize malokluzyon dişsel çapraz kapanış olarak tanımlanmaktadır [8, 17].

Maksillanın transversal yetersizliğinin etiyolojik faktörleri arasında genetik ve çevresel faktörler yer almaktadır [20]. Literatürde, genetiğin kraniyofasiyal yapılar üzerinde etkili olduğuna dair çok sayıda çalışma mevcuttur. Posterior çapraz kapanış, genellikle dar bir maksilla ve derin palatal kubbe ile karakterize olup, uzun yüz

yapısıyla ilişkilendirilmektedir ve ailesel geçiş gösterebilmektedir. Posterior apraz kapanışın, süt ve erken karışık dişlenme dönemindeki hastalarda %8-22, genel popülasyonda ise %5-15 oranında görüldüğü rapor edilmiştir [21].

Karmaşık bir yapı olan kraniyofasiyal yapılar ve dental malokluzyonlar, multifaktoriyel bir etiyolojiye sahiptir [22]. Maksiller darlığın genetik faktörler dışında anormal fonksiyonel alışkanlıklara bağlı olarak da gelişebileceği belirtilmiştir [23]. Parmak emme, uzun süreli emzik kullanımı, anormal yutkunma alışkanlıkları ve ağız solunumuna bağlı olarak maksillada transversal yetersizlik görülebilmektedir [24]. Bu bulgular, Moss'un orofasiyal kompleksin doğru fonksiyonunun yüz, çene ve dişlerin gelişimi üzerinde etkiye sahip olduğu teorisiyle uyumludur [25].

Allen ve ark., posterior çapraz kapanışın oluşumunda persiste süt dişleri, süt dişlerinin erken kaybı, çapraşıklık, damak yarığı, genetik faktörler, diş anatomisi veya sürme dizisindeki anormallikler, parmak emme, kritik büyüme dönemlerinde ağız solunumu ve temporomandibular eklemdaki disfonksiyonların etkili olduğunu belirtmiştir [26]

Melink ve ark., posterior çapraz kapanış bulunan bireyler ile çapraz kapanış bulunmayan bireyleri karşılaştırmış ve posterior çapraz kapanışa sahip bireylerde kısa lingual frenulum olduğunu rapor etmiştir [27].

Proffit ve ark., kronik nazal obstrüksiyon veya nazal enflamasyon nedeniyle gelişen ağız solunumunun, mandibulanın posterior rotasyonuna ve dilin maksilla yerine mandibulada konumlanmasına yol açarak maksiller darlığa sebep olabileceğini vurgulamıştır [9].

Ağız solunumunun etkisiyle dil ağız tabanına yerleşmekte ve maksillada posterior dişleri destekleyememektedir. Bu nedenle intraoral kas dengesi, buksinatör kas lehine değişmektedir. Bu dengesizlik sonucunda st dental arkta daralma meydana gelmektedir. Aynı zamanda dilin mandibulada konumlanmasına bağlı olarak mandibular ark genişlemekte ve bu durum çapraz kapanış oluşmasına neden olabilmektedir [28].

Lione ve ark., ağız solunumu yapan çocukları kontrol grubu ile karşılaştırdıkları bir çalışmada maksiller arkta anteriordan posteriora doğru giderek artan daralma olduğu belirtilmiştir [29].

Bununla birlikte, literatürde fonksiyonel alışkanlıkların maloklüzyon gelişimine etki derecesi konusunda fikir birliği bulunmamaktadır [17]

2.2.2 Teşhis yöntemleri

Maksiller darlık, ortodontik tedavi gerektiren önemli bir malokluzyondur. Bu durum hem estetik hem fonksiyonel problemlere yol açabilmektedir. Maksillanın transversal olarak dar olması yüz ve çene yapısını etkileyerek dişlerin ark içerisindeki sıralanmasını bozabilmektedir. Bunun sonucunda çiğneme, konuşma ve solunum gibi temel fonksiyonlarda zorluklar görülebilmektedir. Ayrıca, çapraz kapanış tarafındaki kas hiperaktivitesi büyüme döneminde negatif etkilere neden olarak yüzde asimetriye, orta hat sapmasına veya temporomandibular eklem problemlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle, maksiller darlığın erken teşhis ve tedavisi, hastanın yaşam kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır. [17, 27, 30].

Maksiller darlığın teşhisinde; klinik muayene, radyografik değerlendirme, fonksiyonel testler, model analizleri, okluzogram gibi birden fazla yöntem kullanılmaktadır [30].

Klinik muayene

Maksillanın transversal yetersizliğinin teşhisinde ilk ve en önemli adımlardan biri detaylı bir klinik muayenedir. Klinik muayene sırasında hastanın yüz yapısı, intraoral anatomisi, ark genişliği ve kapanış ilişkileri dikkatlice değerlendirilmelidir. Maksiller darlığı olan bireylerde genellikle dar ve uzun yüz yapısı, dar burun tabanı ve bazen çökük bir orta yüz görünümü dikkat çekmektedir [31]. Paranasal bölgedeki çöküklük, ve nazolabial kıvrımların derinleşmesi, maksiller yetersizliğe bağlı olarak ortaya çıkabilen karakteristik bulgulardır [31]. Gülümseme sırasında ağız köşesi ile maksiller posterior dişlerin bukkal yüzeyleri arasındaki boşluğun artması, maksiller darlığın işaretlerinden biridir [3].

Proffit ve ark., transversal değerlendirmenin hastanın bizigomatik genişlik gibi kişiye özgü transversal ölçümlerinin oranlanmasıyla yapılması gerektiğini belirtmektedir. Fasiyal indeks, fasiyal yüksekliğin genişliğe oransal ilişkisini ifade etmektedir. Fasiyal indekse bağlı olarak, maksiller ark genişletildiğinde bukkal koridorların daralması daha estetik bir gülüş elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, aşırı genişletme sonucunda bukkal koridorların tamamen kaybolması estetik açıdan istenmeyen bir duruma neden olabilmektedir. Bu nedenle, dental arkın transversal genişliği ile yüzün transversal boyutları arasında uyum sağlanmalıdır. Gülümseme sırasında yanakların posterior dişlerle olan ilişkisi, klinikte dental ark genişliğini değerlendirmek için rutin olarak kullanılan bir kriterdir [32].

Maksiller darlık, transversal yetersizlikle sınırlı kalmayıp büyüme sürecine bağlı olarak diğer iskeletsel deformitelerle de ilişkilendirilmektedir. Bu deformiteler arasında maksiller vertikal ve anteroposterior hipoplazi ile zigomatik bölgenin yetersiz gelişimi yer almaktadır. [31].

İntraoral muayenede ise maksiller dental arkın genişliği ve formu değerlendirilerek alt ark ile olan ilişkisi incelenmelidir. Maksiller darlık bulunan bireylerde, genellikle daralmış bir üst dental ark ve buna bağlı olarak posterior çapraz kapanış gözlenmektedir. Palatal kubbenin yüksekliği ve derinliği de önemli bir değerlendirme kriteridir. Derin ve yüksek palatal kubbe, genellikle maksiller darlık ile ilişkilendirilmektedir [32]. Maksiller darlığı genellikle maksiller molar dişler bukkale, mandibular molar dişler ise linguale eğimlenerek kamufle etmektedir [32, 33].

Posterior çapraz kapanışın unilateral olduğu olgularda fonksiyonel mandibular kaymanın eşlik edip etmediği değerlendirilmelidir. Sentrik ilişki durumundayken erken temaslar nedeniyle alt çenenin fonksiyonel kayma gerçekleştirmesi, erken dönemde fark edilmezse morfolik forma dönüşebilmektedir. Bu durum asimetric çene gelişimi açısından risk oluşturmaktadır [32, 34].

Klinik muayene sırasında hastanın yutkunma ve solunum paterni değerlendirilmelidir. Maksiller darlığa sahip bireylerde dil, genellikle ağız tabanında konumlanarak palatal desteği azaltabilmektedir. Bu durum, dilin fonksiyonel olarak maksiller genişlemeye katkıda bulunamamasına ve dolayısıyla darlığın ilerlemesine neden olabilmektedir. Solunum değerlendirmesinde ise hastanın ağızdan mı yoksa burundan mı solunum yaptığı belirlenmelidir. Kronik ağız solunumuna sahip bireylerde maksiller darlık, derin palatal kubbe ve anterior açık kapanış gibi bulgular sıklıkla gözlemlenmektedir [35]. Ağız solunumu yapan bireylerde dil ağız içerisinde ağız tabanında pozisyonlanma eğilimindedir. Bu durum kas dengesini bozarak üst dişlerde çapraşıklığa, maksiller arkın daralarak V şeklini almasına ve posterior dişlerin çapraz kapanışına neden olabilmektedir [36, 37]. Lione ve ark, yutkunma sırasında dil pozisyonunun önemli bir teşhis kriteri olduğunu belirtmiştir. Anormal yutkunma alışkanlıkları, dilin yanlış yerleşimiyle birlikte maksiller gelişimi olumsuz etkileyebilmektedir [29].

Sagittal ve vertikal iskeletsel deformiteler belirgin yüz bulgularına sahip olduğu için klinik tanısı daha kolay olmaktadır. Transversal maksiller darlık, diğer

malokluzyonlara kıyasla daha az yumuşak doku değişiklikleriyle görülebilmekte ve klinik tanısı zor olabilmektedir. Özellikle sagittal ve vertikal deformitelerle birlikte görüldüğünde transversal darlık gözden kaçabilmektedir. Literatürde, klinik muayenenin tek başına yetersiz kaldığı ve tanı değerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle klinik muayene sırasında elde edilen bulgular radyografik ve model analizleri ile desteklenerek daha kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmelidir [31].

Radyolojik değerlendirme

Maksiller darlığın teşhisinde radyolojik görüntüleme, iskeletsel ve dental yapıların detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Radyolojik incelemeler, üst çenenin transversal darlığının iskeletsel mi yoksa dental mi olduğunu ayırt etmek, ark genişliklerini değerlendirmek ve iskeletsel deformiteleri incelemek amacıyla kullanılabilir. Anteroposterior sefalometrik analizler, konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT) ve okluzal radyografiler gibi farklı teknikler, maksillanın transversal yöndeki yetersizliğini teşhis etmek amacıyla kullanılmaktadır [33, 38].

Panoramik radyografiler, dişlerin dizilimi, sürme paternleri ve alveolar kemiğin değerlendirilmesi açısından tercih edilen radyolojik görüntüleme tekniklerinden biridir. Maksiller darlık ile ilişkili olarak diş çapraşıklıkları, sürme problemleri ve diş eksiklikleri panoramik radyografi ile tespit edilebilmektedir [39]. Gosh ve ark., panoramik radyografide horizontal ölçümlere göre vertikal ölçümlerin daha doğru olduğunu belirtmişlerdir. Panoramik görüntüleme yöntemi transversal darlığın teşhis edilmesinde sınırlı kalmaktadır [40].

Posteroanterior sefalometrik radyografi (PA), maksillanın transversal boyutunun mandibula ve diğer kraniyofasiyal yapılar arasındaki ilişkisini değerlendirmek için kullanılan iki boyutlu geleneksel bir yöntemdir. Bu görüntüleme tekniği ile maksillanın genişliğini, çene kemiklerinin simetrisini, nazal taban yapısını ve mandibula ile olan ilişkisi analiz edilebilmektedir. PA radyografiler ile intermolar ve interkanin gibi transversal ölçümler değerlendirilebilmektedir. Ancak bu yöntem süperpozisyonlar nedeniyle ölçüm sınırlamalarına sahiptir ve transversal uyumsuzlukların değerlendirilmesinde yetersiz kalabilmektedir [31, 41, 42].

Ricketts ve ark., posteroanterior radyografiler kullanarak, maksillanın transversal genişliğini sol ve sağ jugale (J-J) mesafesi, mandibular genişliği ise sol ve

sağ antegonial çentik (Ag-Ag) mesafesi üzerinden ölçerek normatif değerler belirlemiştir [43].

Ricketts ve Grummons, 3 ile 21 yaş aralığındaki kişilerde J-J mesafesinin yılda 1 mm artışla 55 mm'den 73 mm'ye, Ag-Ag mesafesinin ise erkeklerde yıllık 1.5 mm artarak 68 mm'den 94 mm'ye ulaştığını bildirmiştir [44].

Wagner ve Chung, posteroanterior ve lateral radyografileri kullanarak transversal büyüme ile vertikal yüz tipleri arasında bir ilişki olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmalarında, 6 yaşındaki dolikofasiyal bireylerin (J-J) ve (Ag-Ag) genişliklerinin, brakifasiyal bireylere kıyasla daha dar olduğunu ve bu farkın 18 yaşına kadar devam ettiği rapor edilmiştir [45].

Anteroposterior sefalometrik görüntülerde, süperpozisyonlar ve radyografi sırasında başın pozisyonlandırılmasındaki hatalar nedeniyle, referans noktalarının belirlenmesini zorlaştırmakta ve bu durum yöntemin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, CBCT görüntülerine göre anteroposterior sefalometrik görüntülerin daha düşük doğruluğa sahip olduğu bildirimiştir [46].

Son yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte konik ışınlı bilgisayarlı tomografi, maksiller darlık tanısında altın standart haline gelmiştir. CBCT ile maksiller arkın genişliği, maksillanın iskeletsel genişliği, palatal derinlik, sutur maturasyonu, sinüs genişliği, dişleri destekleyen alveol kemik yapısı, dişlerin bukkolingual eğimleri, bazal kemik ve kök pozisyonları üç boyutlu olarak detaylı bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Bu yöntem, özellikle sınır vakalarda iskeletsel ve dental yapıların ayrıntılı analizini sağlayarak teşhisin doğruluğunu artırmaktadır. İki boyutlu radyografilerin dezavantajı olan süperpozisyonlar ve magnifikasyonların önüne geçilerek daha doğru teşhis yapılabilmesini sağlamaktadır [10, 13, 18, 33, 46, 47].

CBCT görüntüleme yöntemi ile midpalatal suturun maturasyonu değerlendirilerek genişletme tedavisinin başarısı öngörülebilmektedir [13, 48]. Buna ek olarak, maksillanın genişletilmesi sonrasında meydana gelen kemik değişimleri ve diş hareketleri, üç boyutlu olarak ayrıntılı biçimde değerlendirilebilmektedir. [49].

CBCT ile hava yolu değerlendirmesi yaparak daralmış nazal pasajlar da tespit edilebilmektedir ve böylece solunum fonksiyonlarıyla ilişkili olası problemlerin belirlenmesine yardımcı olabilmektedir [50, 51].

Model analizleri

Model analizleri; dişlerin bukkolingual inklinasyonlarının, dental arkın genişliğinin ve çapraşıklık miktarının değerlendirilmesini sağlayarak maksiller darlığın şiddeti hakkında bilgi vermektedir [18, 32, 52]. Günümüzde, geleneksel model analizlerine ek olarak dijital model analizleri de yaygın şekilde kullanılmaktadır [53, 54].

Öncelikle modeller, posterior dental kompanzasyonlar açısından incelenmelidir. Bu kompanzasyonlar genellikle maksillada diş kuronlarının bukkale, mandibulada ise kuronların linguale doğru eğimlenmesi şeklinde görülmektedir [55].

Howes model analizinde, alçı modeller üzerinden ölçümler yapılarak dişler ve apikal kemik kaidesi arasındaki transversal ilişki değerlendirilmektedir. Bu analizde 15 ideal oklüzyonlu hastanın verileri kullanılarak norm değerleri oluşturulmuştur. Apikal kemik kaidesinin genişliği, fossa kaninalar arasındaki mesafe ile değerlendirilmektedir. Maksiller transversal genişliğin ideal olduğu bireylerde fossa kaninalar arası mesafe, premolar dişler arasındaki genişliğe eşit veya bu mesafeden büyük olmalıdır [56].

Andrews, WALA çıkıntısını mandibular ark genişliği ve şeklini değerlendirmede referans noktası olarak değerlendirmiştir. Mukogingival birleşim hattının en belirgin noktası olan WALA çıkıntısı, mandibular molarların ideal konumunu belirlemede kullanılmaktadır. Andrews'e göre mandibular arkta, birinci molarların kuronunun merkezi WALA çıkıntısından 2 mm uzaklıkta olmalıdır. Mandibular ark genişliği ise molarların santral fossaları arasındaki mesafe ile tespit edilmektedir. Maksillada ise birinci molarların oklüzal düzlemi, başın transversal düzlemine paralel olmalıdır ve sağ-sol maksiller birinci molarların meziolingual tüberkülleri arasındaki mesafe mandibular molarların santral fossaları arasındaki mesafeye eşit olmalıdır [18, 57].

Amerikan Ortodonti Kurulu (ABO) 1999 yılında teşhis, tedavi planlaması ve değerlendirme sürecini daha objektif hale getirmek amacıyla Objektif Derecelendirme Sistemi (OGS)'ni uygulamaya koymuştur. Bu sistemin amacı, güvenilirlik ve tutarlılığı sağlamaktır. Bir vakanın başarısız kabul edilmesi için belirlenen kriterlerden 30'dan fazla puan kaybetmesi gerekmektedir. Bu sistemde, molar dişlerin bukkolingual eğimini değerlendirmek için ABO ölçüm cetveli kullanılmaktadır. Cetvel sağ ve sol birinci molar dişe yerleştiriliğinde hem bukkal hem de lingual tüberküllerle temas

etmelidir. ABO ölçüm cetveli, 1 mm'lik artışlarla ölçüm yapılmasına olanak tanımakta ve okluzal düzlemden 1 mm'lik sapma yaklaşık 10°'lik bukkolingual eğime karşılık gelmektedir [54].

McNamara, malokluzyonu olmayan ve ortalama diş boyutlarına sahip bireylerde premolarlar arası ideal transpalatal genişliğin 36-39 mm aralığında olması gerektiğini, karışık dişlenme döneminde ise bu değerin 33-35 mm arasında olması gerektiğini ifade etmiştir. Transpalatal genişliğin 31 mm altında olması durumunda ise ekspansiyon ihtiyacının oluşabileceğini vurgulamıştır [3].

Pont, ideal dental ark genişliğini belirlemek amacıyla "Pont İndeksi" adı verilen bir hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemde, maksiller dört kesici dişin meziodistal genişliklerinin toplamı (S) baz alınarak ideal premolarlar arası ve molarlar arası genişlikler hesaplanmaktadır. Genişlik ölçümlerinde, birinci premolar ve birinci molarların oklüzal yüzeylerindeki orta noktalar referans alınmıştır. Pont'un hesaplama yöntemine göre ideal premolarlar ve molarlar arası genişlik değerleri aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır [58].

İdeal premolarlar arası genişlik = $(S \times 100) / 80$

İdeal molarlar arası genişlik = $(S \times 100) / 64$

Günümüzde çoğu ortodontist, dijital ortodontik kayıtları klinik uygulamalarında kullanmaktadır. Bu sayede teşhis ve tedavi planlamasında bilgisayar yazılımlarından faydalanabilmekte ve hasta modellerini arşivlemek için fiziksel yer ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır [54].

2.2.3 Maksiller darlık tedavi yöntemleri

Maksiller darlık ve buna bağlı gelişen posterior çapraz kapanışın erken dönemde düzeltilmesi; diş pozisyonlarının ideal hale getirilmesini, eklem sağlığını tehdit edebilecek fonksiyonel kaymaların önlenmesini ve çapraşıklığın giderilmesini sağlayan önemli bir tedavi yöntemidir [32, 59]. Literatürde posterior çapraz kapanışa sahip hastaların %16'sından az vakanın kendiliğinden düzelme gösterdiği belirtilmiştir [60].

Maksiller darlık tedavisinde ortodontik, ortopedik ve cerrahi destekli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Tedavi yöntemi; hastanın yaşına, malokluzyonun şiddetine, hedeflenen etkiye, genişletme hızına ve biyolojik yanıtı göre belirlenmektedir.

Maksiller genişletme amacıyla literatürde yavaş üst çene genişletmesi (SME), hızlı üst çene genişletmesi (RME), yarı hızlı üst çene genişletmesi, minivada destekli üst çene genişletmesi (MARPE), cerrahi destekli hızlı maksiller ekspansiyon (SARME) yöntemleri kullanılmaktadır [61, 62].

Geleneksel ortodontik tedaviler, hastalarda estetik olarak endişe oluşturmaktadır [63]. Geleneksel tedavilerin estetik limitasyonlarını ortadan kaldırmak ve hasta beklentilerini karşılayabilmek için hasta beğenisine hitap eden sistemlerin gelişimi hızlanmıştır. Bu sürecin temel amacı, apareyin görünürlülüğünü azaltmaktır [64]. Son yıllarda şeffaf plaklar ile üst çene genişletme protokolü güncel bir tedavi yaklaşımı olarak kabul edilmektedir. Şeffaf plaklar, daralmış dental arkı genişletilerek dişlerin düzgün hizalanmasını için yer sağlayabilmektedir [65].

Yavaş Üst Çene Genişletmesi (SME)

Yavaş üst çene genişletmesi, maksiller darlığı olan hastalarda öncelikli olarak ortodontik kuvvetler sağlayarak suturaların gerilim dayanımını aşmadan genişleme sağlamayı hedefleyen bir tedavi yöntemidir. SME protokolleri, yaklaşık birkaç ons ile 2 pound (57-900 gram/5-20 Newton) aralığında değişen kuvvetler uygulamaktadır. Bununla birlikte literatürdeki çalışmalarda, SME ile özellikle süt veya karışık dişlenme dönemindeki bireylerde midpalatal suturun ortopedik olarak ayrıldığı gösterilmiştir. Haftada 0.5 mm genişletme uygulanan hastalarda, ark genişliğindeki artışın yaklaşık %20'sinin midpalatal suturun ortopedik ayrılmasından kaynaklandığı bilirlmiştir. Radyografik bulgular da karışık ve süt dişlenme döneminde uygulanan yavaş üst çene genişletme protokolünde midpalatal suturun ayrıldığını doğrulamaktadır [32].

SME ile meydana gelen ortopedik değişimlerin derecesinin hastanın yaşıyla ters orantılı olduğu rapor edilmiştir. Yaş ilerledikçe fasiyal suturuların özellikle postpubertal dönemde daha fazla interdigitasyon gösterdiği bilinmektedir. Cinsiyet de suturların maturasyon hızını etkilemektedir ve kızlarda sutur maturasyonu erkeklere göre daha erken tamamlanmaktadır. Puberte sonrası dönemde suturların açılabilmesi için daha yüksek değerde kuvvet gerekmekte ve bu kuvvet fizyolojik adaptasyon kapasitesini aşabilmektedir [59, 66, 67].

SME Endikasyonları:

- Tek taraflı veya çift taraflı çapraz kapanış
- Minimal çapraşıklık düzeltmek için yer sağlamak

- Daimi dişlenme döneminde dental çapraz kapanışın tedavisi
- Yavaş ve sürekli kuvvetler uygulayarak dudak-damak yarığı olan hastalarda maksiller darlığın tedavisi [68]

Yetişkin hastalarda SME yönteminin etkisi ile ilgili literatürdeki çalışmalar sınırlıdır [66]. Bassarelli ve ark., 50 yetişkin hasta üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada ortalama 3 mm transversal genişletme sağlandığı ve herhangi bir yan etki oluşmadığını rapor etmiştir [69]. Machado ve Crespo ise 12 yetişkin hasta ile yaptıkları çalışmada başarılı maksiller genişleme elde ettiklerini bildirmiştir [70].

Literatürdeki bazı çalışmalarda SME'nin RME'ye göre daha stabil sonuçlar verdiği belirtilmektedir [67]. Lagravera ve ark, SME'nin RME'ye kıyasla daha stabil olabileceğini ve genişletmenin stabilitesinin hastanın yaşına bağlı olduğunu rapor etmiştir [71]. Hicks, SME tedavisinden sonra retansiyon süresinin, genişletme süresinin %50-100'ü arasında olması gerektiğini belirtmiştir [72].

Yarı-Hızlı Üst Çene Genişletmesi

Yarı-hızlı üst çene genişletmesi, genellikle haftada 1 mm genişletme sağlayacak şekilde uygulanan hızlı ve yavaş genişletme protokolleri arasında bir yöntemdir. Bu yöntemin hızlı genişletme protokolüne göre daha az doku travması ve ağrıya neden olduğu, yavaş genişletmeye göre ise daha etkili bir sutural ayrılma sağladığı savunulmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, hızlı genişletme protokolünün kapiller damar ağının iyileşme sürecine yetişememesine bağlı olarak dokuların yetersiz onarımına neden olabileceğini göstermiştir. Buna karşılık, yarı-hızlı üst çene genişletmesiyle suturun daha dengeli bir şekilde ayrıldığını ve uzun vadede daha stabil sonuçlar elde edileceğini savunan görüşler mevcuttur [62].

Hızlı üst çene genişletme sırasında fasiyal kemiklerin ani genişlemesinin uzun dönemde nükse neden olabileceği düşünülerek midpalatal sutur ayrılmasını takiben yavaş genişletme uygulanması önerilmiş ve bu doğrultuda yarı-hızlı üst çene genişletme protokolü geliştirilmiştir. Bu yöntemde, ilk 5-6 gün günde iki tur, devam eden süreçte ise haftada üç tur genişletme uygulanması önerilmektedir. Yarı-hızlı üst çene genişletmesinin, nazomaksiller kompleksin adaptasyon sürecini destekleyerek relaps riskinin azaltılabileceği düşünülmektedir [73].

Hızlı Üst Çene Genişletmesi (RME)

Hızlı üst çene genişletmesi, ortodontik tedavilerde posterior çapraz kapanış, dental çapraşıklık ve maksiller transversal darlığın düzeltilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. RME'nin temel prensibi, midpalatal suturu ve sirkummaksiller sutur sistemini ayırarak üst çenede iskeletsel genişleme elde etmektedir [13].

Midpalatal suturun genişletme tedavisi ile açılabilceği fikri, yaklaşık 150 yıl önce Angell tarafından ortaya atılmıştır [74]. Ancak 1860-1930 yılları arasında literatürde sert damakta genişletme elde edilebileceğine yönelik fikir birliği bulunmamaktadır [13]. Bu yöntemin etkinliği konusundaki bilimsel kanıtlar, 1960'lı yıllarda Haas'ın çalışmalarıyla güçlenmiş ve RME, modern ortodontik tedavi protokollerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [75].

RME Endikasyonları:

- Dental, iskeletsel veya her ikisinin kombinasyonu olarak görülen maksiller darlık nedeniyle tek taraflı veya çift taraflı posterior çapraz kapanış [32]
- Maksiller molar ve mandibular molar dişler arasındaki transversal sapmanın 4 mm'den fazla olması [20]
- Dudak damak yarıklı bireylerde [76]
- Dental çapraşıklık olan hastalarda yer sağlamak [32]
- Posterior molar dişlerin inklinasyonlarının düzeltilmesi [20]
- Nazal hava yolunun arttırılması ve burun solunumunun iyileştirilmesi [77]
- Fonksiyonel tedavi veya ortognatik cerrahi öncesi hazırlık [32]
- Sınıf III fonksiyonel tedavi sırasında sutur mobilizasyonunu sağlamak [3]
- Dar bukkal koridora sahip hastalarda, gülümseme estetiğini ve dental ark uyumunu iyileştirmek [3, 32]
- Asimetrik kondil pozisyonu ve TME disfonksiyonu olan hastalarda, posterior dişlerin stabil oklüzyona yönlendirilmesini sağlamak [78]
- Sınıf II malokluzyonların spontan düzeltilmesini desteklemek [3]

Maksiller genişletmenin temel amacı yalnızca dişleri hareket ettirerek dental arkı genişletmek değil, iskeletsel olarak da maksillanın genişlemesini sağlamaktır.

RME'nin temel prensibi, posterior dişlere hızlı kuvvet uygulayarak diş hareketine zaman tanımadan kuvvetin doğrudan sutura iletilmesini sağlamaktır [32].

RME ile günde 0.5-1 mm genişletme ile yaklaşık 2-3 hafta içerisinde toplam 10 mm ve daha fazla genişleme sağlanabilmektedir. Aktivasyon sürecinde, suturun ayrılmasına bağlı olarak üst santral kesici dişler arasında orta hat diasteması oluşmaktadır. Midpalatal suturun açılması ile oluşan boşluk, doku sıvıları ve kan ile dolmaktadır. Oluşan bu boşlukta, yeni kemik dokusunun oluşmasını sağlayabilmek için aygıtın en az 3-4 ay retansiyonu gerekmektedir. Bu süreç içerisinde, kemik segmentlerinin ayrılması ile oluşan orta hat diasteması gingival fibrillerin etkisiyle kapanmaktadır [32].

Maksiller posterior dişlerdeki devrilmeyi önlemek amacıyla, farklı RME aparey tasarımları geliştirilmiştir. RME amacıyla, literatürde bonded ve banded apareyler en yaygın kullanılan türlerdir [79].

Maksiller premolar ve molar dişlere yerleştirilen bantlarla birlikte orta hatta bulunan genişletme vidası (jackscrew) bulunmaktadır. Haas tipi aygıtlarda genişletme vidası palatal mukozaya temas eden akrilik parça içerisinde bulunurken, Hyrax tipi aygıtlarda herhangi bir akrilik parça bulunmadan palatinal kontura uyumlu şekilde yerleştirilmektedir [79].

Maksiller posterior dişlerin okluzal, bukkal ve palatinal yüzeylerini tamamen akrilik materyalle kaplayan bonded apareyler, siman aracılığıyla dişlere sabitlenmektedir. RME maksiller posterior dişlerin ekstrüzyonuna neden olarak, özellikle vertikal büyüme paternine sahip hastalarda istenmeyen etkiler oluşturabilmektedir. Bu etkinin azaltılması amacıyla Asanze ve ark. ile Sarver ve Johnston, okluzal yüzeyi de içerisine alan bonded RPE apareylerinin kullanılmasını önermiştir [81,82]. Bonded apareyler; alveol kemikteki eğilmeyi, molar dişlerin devrilmesini ve dişlerin ekstrüzyonunu azaltarak vertikal yönde de kontrol sağlamaktadır [82-84, 79].

Genişletme kuvvetinin etkisiyle internazal, nazomaksiller, frontonazal, frontozigomatik, zigomatikomaksiller, zigomatikotemporal ve pterigopalatin suturlar gibi sirkummaksiller suturlar etkilenebilmektedir. Çalışmalar RME'nin farklı suturlara olan etkisinin derecesi hakkında farklı bulgular ortaya koymuştur [85].

Midpalatal sutur büyüme sürecinde morfolojik değişimler göstermektedir. Melsen, infantil dönemde frontal kesitlerde suturun Y şeklinde görüldüğünü ve geniş bir yapıya

sahip olduğunu bildirmiştir [86]. Suturen ossifikasyon süreci posterior bölgeden başlayarak anteriora doğru ilerleyecek şekilde interdigitasyonu artırmaktadır [13].

Midpalatal suturen füzyon başlangıcı ve ilerleme hızı, yaş ve cinsiyete göre değişiklik göstermektedir. Literatürde, füzyonun başlangıç ve tamamlanma yaşı ile ilgili fikir birliği bulunmamaktadır. Farklı yaş gruplarında farklı suture maturasyonu bildiren çalışmaların bulguları, suture füzyonunun kronolojik yaşla doğrudan ilişkili olmadığını ortaya koymaktadır [13].

RME ile uygulanan kuvvetler yalnızca midpalatal suture değil, dişlere ve çevre dokuları da etkileyerek dentoalveoler genişlemeye neden olmaktadır. Bu durumun alveoler kemikte eğilme ve yer değiştirme, dişlerde devrilme ve ekstrüzyon gibi yan etkilere neden olabilmektedir. Dental yan etkiler sonucunda palatinal tüberküllerin sarkmasına bağlı olarak dikey boyutta artış, kök rezorpsiyonu, periodontal ataşman kaybı ve bukkal kortikal kemikte fenestrasyon ve dehiscens gibi istenmeyen sonuçlarla karşılaşılabilir. Özellikle kontrolsüz genişletme ve yetersiz retansiyon süresi bu yan etkilerin şiddetini artırabilmektedir [87].

Cerrahi Destekli Hızlı Üst Çene Genişletmesi (SARME)

Adolesan hastalarda uygulanan ortopedik üst çene genişletmesi, interdigitasyona uğramış midpalatal ve sirkummaksiller sutureların direncinin artması nedeniyle genellikle gerçekleşmemektedir. Bu nedenle maksiller darlığı olan yetişkin hastalarda cerrahi destekli hızlı üst çene genişletmesi uygulanabilmektedir. SARME'nin temel amacı, maksillanın lateral destek bölgelerine yapılan kesilerle kemik direncini azaltarak ortopedik ekspansiyon sağlamaktır. Bu prosedürde LeFort I osteotomisinde yapılan kemik kesileri gerçekleştirilmekte, ancak downfracture işlemi uygulanmamaktadır. Bunun sonucunda, genişleme yalnızca yumuşak doku direncine karşı gerçekleşmekte ve osteotomi bölgeleri, distraksiyon osteogenezi mekanizmasına benzer şekilde hareket ettirilmektedir [32].

SARME Endikasyonları:

- Maksiller dental arkı genişleterek posterior çapraz kapanışı düzeltmek
- Segmental maksiller osteotomi sırasında oluşabilecek stabilite sorunlarını ve riskleri azaltmak
- Ortognatik cerrahi öncesinde maksiller arkı genişletmek

- Çapraşıklık için yer sağlamak
- Dudak damak yarığı olan hastalarda maksiller transversal darlığı tedavi etmek
- Gülümseme estetiğini iyileştirmek amacıyla bukkal karanlık koridor genişliğini azaltmak
- Sutural direnç nedeniyle RME ile yeterli genişleme sağlanamayan hastalarda direnci ortadan kaldırarak etkili bir genişleme elde etmek [88]

Maksiller genişletme yönteminin belirlenmesinde önemli faktörlerden biri yaş olup, cerrahi destek gerekliliği konusunda kesin bir kronolojik yaş sınırı bulunmamaktadır. Bazı araştırmacılar, maksiller genişletmenin 14 yaşına kadar cerrahi müdahale olmadan gerçekleştirilebileceğini belirtirken, diğer çalışmalar bu sınırın 25 yaşa kadar uzayabileceğini belirtmektedir [89, 90]. Literatürde erkeklerde 25, kadınlarda ise 20 yaş sonrasında cerrahi desteğin gerekli olduğunu savunan çalışmalar mevcuttur [91].

RME ile karşılaştırıldığında SARME'nin, sutural direnci ortadan kaldırarak dental hareketleri sınırladığı ve böylece periodontal yan etki riskini azalttığı öne sürülmektedir. Ancak kullanılan apareyin uyguladığı kuvvetler periodontal ligamente baskı oluşturarak alveolar kemik rezorpsiyonuna ve ataşman seviyesinde azalmaya neden olabilmektedir. Ayrıca ağrı, kanama, enfeksiyon, sinüzit, diş kaybı, palatal mukozada ülserasyon, asimetrik genişleme, aseptik nekroz ve orbital komplikasyonlar gibi daha ciddi yan etkiler de görülebilmektedir [92, 93].

Minivida Destekli Hızlı Üst Çene Genişletmesi (MARPE)

Son yıllarda, dişlerden destek alan üst çene genişletme protokollerinin yan etkilerini azaltmak amacıyla minivida destekli üst çene genişletme apareyleri geliştirilmiştir. Bu protokolde dişlere gelen yük minivida ile paylaşılmaktadır. 2007 yılında Wilmes ve ark., anterior palatal bölgeye iki minivida ve süt molar dişlerine yerleştirdikleri hibrid hyrax genişletme apareyini literatüre tanıtmıştır [94].

MARPE yöntemi, diş eksikliği durumlarında bile üst çene genişletmesi yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Diş kökleri ve kan damarlarından uzak olması ve sağlam kortikal kemik yapısı nedeniyle anterior palatinal bölgedeki T-Zone, minivida'nın yerleştirilmesi için güvenli bölge olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar, ankraj alınan dişlerde daha az devrilme, daha fazla iskeletsel genişleme, bukkal kortikal kemiğin korunması, hava yolunda daha fazla artış ve kök

rezorpsiyonunda azalma gibi etkilerin dental destekli üst çene genişletmesi yöntemlerine göre MARPE yönteminde daha kontrollü sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Genişletme tamamlandıktan sonra aygıt en az 3-4 ay retansiyon amacıyla sabit tutulmalıdır [32, 94].

MARPE yönteminin geleneksel yöntemlere kıyasla ortopedik olarak daha etkili olduğuna dair literatürde fikir birliği bulunmamaktadır. Diş destekli ve kemik destekli apareyler CBCT verileri kullanılarak karşılaştırılmış ve MARPE yönteminin daha fazla iskeletsel etki oluşturup oluşturmayacağına yönelik farklı sonuçlar elde edilmiştir [85].

Şeffaf Plaklarla Dental Ekspansiyon ve G8 Protokolü

Güncel bir tedavi yöntemi olan şeffaf plak tedavisi, geleneksel ortodontik tedavilere estetik bir alternatif olarak sunulmuştur. Yapılan çalışmalar, şeffaf plak tedavisinin dentoalveolar çapraz kapanışı düzeltebildiğini ve arklar arası transversal uyumu sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle şeffaf plakların oklüzyonu açarak dişleri birbirinden ayırması, okluzal interferansları ortadan kaldırarak çapraz kapanışın tedavi edilmesine yardımcı olmaktadır. [95, 96].

Align Technology, tedavi etkinliğini artırmak ve klinik sonuçları iyileştirmek amacıyla G-serisi yazılımını geliştirmektedir. Bu yazılım serisi, 2010 yılında G3 protokolüyle başlamış; 2011’de G4, 2014’te G5 güncellemeleriyle devam etmiş ve son olarak 2021 yılında G8 protokolünde SmartForce plak aktivasyon teknolojisi ile önemli bir yenilik sunulmuştur. G-serisi yazılım güncellemeleri, diş hareketlerinin daha öngörülebilir ve kontrollü bir şekilde planlanmasına olanak tanıyarak genel tedavi başarısını artırmayı hedeflemektedir [97].

Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, Kaliforniya) firması, 2021 yılında G8 protokolüyle birlikte optimize ekspansiyon destek ataşmanını tanıtmıştır. Dental ekspansiyon sırasında meydana gelen tork kaybını engelleyebilmek için G8 protokolünde, optimize ekspansiyon destek ataşmanı ile sinerjik bir şekilde çalışarak premolar ve molar dişlere otomatik olarak bukkal kök torku eklendiği belirtilmektedir [98].

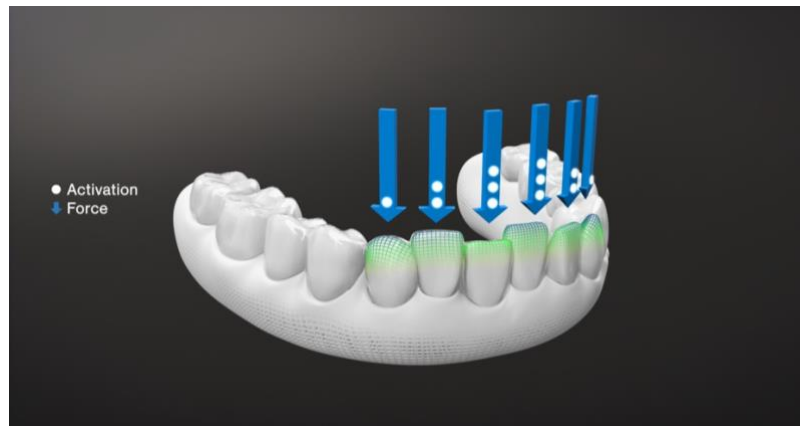
G8 Protokolü

Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, Kaliforniya) firması, G8 protokolü ile ortodontik tedavi etkinliğini ve öngörülebilirliği artırmak amacıyla geliştirilmiş yenilikler sunmaktadır. Bu yeniliklerin amacı; derin kapanış vakalarında daha etkili tedaviler sağlamak, spee eğrisini düzeltmek, yeni geliştirilen posterior ataşmanlarla posterior ark ekspansiyonunu desteklemek ve bukkal kök torku aktivasyonları ile diş hareketlerinin daha kontrollü gerçekleşmesini sağlamaktır [98].

Derin kapanış vakalarında SmartForce plak aktivasyonu ile anterior dişlerde intrüzyon hedeflenmiş, bu sayede Spee eğrisinin düzeltilmesi ve alt kesici dişlerde daha etkili bir intrüzyon sağlanması amaçlanmıştır [99, 100].

Orta şiddetli ve şiddetli dental çapraşıklıklar ile görülen çapraz kapanış durumlarında, optimize ataşmanlar ve SmartForce plak aktivasyonu ile desteklenen posterior ark ekspansiyonu sayesinde daha kontrollü diş hareketleri elde edileceği iddia edilmiştir. Bu yeni yaklaşımlar aynı zamanda posterior açık kapanış (PAK) oluşma riskini azaltmayı hedeflemektedir [99, 100].

SmartForce plak aktivasyonu, Invisalign sisteminde diş hareketlerini daha kontrollü ve öngörülebilir hale getirmek amacıyla geliştirilmiş bir teknolojidir. Bu sistemde, plak yüzeyindeki belirli alanlar özel olarak şekillendirilmektedir ve stratejik temas alanları oluşturulmaktadır. Bu sayede diş yüzeyine doğru yönde ve optimal kuvvetle baskı uygulanması sağlanarak yan etkiler azaltılmaktadır [100, 101].



Şekil 2.1: Derin kapanış düzeltiminde SmartForce plak aktivasyonu [99].



Şekil 2.2: SmartForce plak aktivasyonu [101].

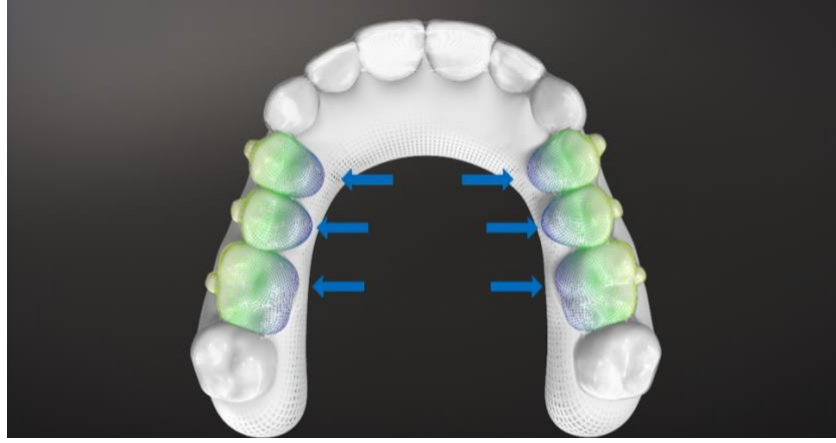
G8 protokolü, küçük azı ve birinci büyük azı dişlerine otomatik olarak bukkal kök torku uygulanarak dişin yalnızca kron kısmının değil, kökün de kontrollü şekilde hareket etmesi sağlamayı hedeflemektedir [99].

G8 protokolünde kullanılan optimize ekspansiyon destek ataşmanları, yatay kubbe formunda tasarlanmış olup G5 protokolündeki ataşmanların modifiye edilmiş bir versiyonudur. Bu ataşmanlar, premolar ve birinci molar dişlerde ekspansiyon hareketini desteklemek amacıyla geliştirilmiştir. G8 protokolünde farklı olarak, ilgili dişte rotasyon hareketi planlandığında, sistem bu durumu otomatik olarak algılayarak rotasyonu düzeltmeye uygun modifiye edilmiş bir ataşman versiyonu yerleştirmektedir. Böylece, ekspansiyonla birlikte rotasyon gerektiren durumlarda ataşmanın ClinCheck yazılımı üzerinden manuel olarak ayarlanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır [98].

SmartForce plak aktivasyonu ise, her dişe uygulanacak kuvvetin miktarını otomatik olarak belirleyerek, tedavi süresi boyunca yeterli ve dengeli kuvvet dağılımını sağlamaktadır. Özellikle bukkal yönde 0,5 mm ve üzeri genişletme planlandığında sistem otomatik olarak SmartForce plak aktivasyonunu uygulamaktadır. Bu sayede, posterior açık kapanış gibi istenmeyen komplikasyonların önüne geçilmesi amaçlanmaktadır [99].



Şekil 2.3: Optimize ekspansiyon destek ataşmanı ve bukkal kök torkunun molar dişe uygulanması [99].



Şekil 2.4: Posterior ark ekspansiyonunda SmartForce plak aktivasyonu [99].

2.3 Ortodontide Diş Hareketi Mekanizmaları

2.3.1 Ortodontide diş hareketi

Ortodontik kuvvetlerin uygulanmasıyla gerçekleşen diş hareketi; pulpa, periodontal ligament (PDL), alveolar kemik ve diş eti gibi çevre dokularda yeniden şekillenme ile karakterizedir. Uygulanan kuvvet sonucu oluşan mekanik gerilmeler, PDL'nin vaskülaritesini ve kan akışını değiştirerek; nörotransmitterler, sitokinler, büyüme faktörleri ve araziidonik asit metabolitleri gibi çeşitli biyolojik olarak aktif moleküllerin sentezini ve salınımını tetiklemektedir. Bu moleküller, periodontal dokulardaki hücreleri uyarak kemik rezorpsiyonunu başlatmaktadır [102].

Ortodontik tedavide diş hareketi, uygulanan mekanik kuvvetlerin periodontal ligament ve çevre dokular üzerinde oluşturduğu biyolojik hareketlerle sağlanmaktadır. Bu süreçte PDL'nin baskı oluşan tarafında kemik yıkımı, gerilme oluşan tarafında ise kemik oluşumu gözlenmektedir. Uygulanan kuvvet, periodontal dokulardaki kan dolaşımı ve kimyasal dengeyi bozarak, bu alanda çeşitli biyokimyasal süreçlerin başlamasına neden olmaktadır. Optimum ortodontik kuvvet, hastaya zarar vermeden ve rahatsızlık oluşturmadan dişin hedef pozisyona ulaşmasını sağlamaktadır. Her hasta ve her diş için bireysel kuvvet değerlendirmesi yapılması, tedavi başarısını artırmaktadır [102].

Diş kökünde, periodontal ligamentte ve alveol kemiğinde en az geri dönüşümsüz hasar yaratarak, en fazla diş hareketi sağlayan kuvvet optimum kuvvet olarak tanımlanmaktadır [32].

Schwarz, optimum kuvveti “doku kapiller basıncına eşit (20-25 g/cm²) düzeyde basınç uygulayan kuvvet” şeklinde tanımlamış ve optimum kuvvetten daha düşük şiddetteki kuvvetlerin dokuda hiçbir değişiklik meydana getirmediğini bildirmiştir [103].

2.3.2 Ortodontide diş hareketi tipleri

Uygulanan kuvvet ve momentin büyüklüğü, yönü ve kuvvetin uygulanma noktasına bağlı olarak dişte gerçekleşen hareketin türü değişmektedir. Kuvvet sistemi ve hareketin türü arasındaki ilişki, moment/kuvvet (M/F) oranı ile ifade edilip dişin rotasyon merkezini belirlemektedir. Rotasyon merkezi ve periodontal dokunun mevcut durumu, dişin gerçekleştireceği hareket türünü belirlemektedir. Kısa diş kökleri veya alveol kemik desteğinin azalması, gerçekleşen hareketin türünü etkileyebilmektedir [104].

Tipping (Devrilme)

Tipping, rotasyon merkezi genellikle dişin direnç merkezinin apikalinde yer alan ve kuron kısmının köke göre daha fazla yer değiştirmesiyle gerçekleşen diş hareketi türüdür [104]. Kuvvet dişin direnç merkezinden geçmediğinde oluşan moment, dişin rotasyon merkezi etrafında dönmesine neden olmaktadır. Tipping hareketinin gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 35-60 g olarak belirtilmektedir [32]. Rotasyon merkezinin konumuna göre kontrolsüz tipping ve kontrollü tipping olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [104].

Kontrolsüz tipping hareketinde, rotasyon merkezi dişin direnç merkezi ile kök apeksi arasında olması nedeniyle kuron ve kök zıt yönde hareket etmektedir. Bu hareket türü basitçe uygulanabilse de istenmeyen yan etkiler oluşturma riski bulunmaktadır. Periodontal dokularda en yüksek stres kuron ile kök apeksi arasında olacak şekilde düzensiz stres alanları oluşmaktadır [104].

Kontrollü tipping yönteminde, rotasyon merkezi kök apeksinde oluşmaktadır. Bu yöntemde, dişin kuron kısmını hareket ettirmeye yönelik yatay bir kuvvet uygulandığında kök apeksinin pozisyonu sabit kalacak şekilde bir moment uygulanmaktadır. Bu hareket türü kök apeksindeki stresi azaltarak periodontal dokularda daha az yan etki oluşturarak dişin hareketini sağlamaktadır [104].

Şeffaf plak tedavilerinde plaklar, diş yüzeyine itme kuvveti uygulayarak dişleri hareket ettirmektedir [105]. Buna bağlı olarak, şeffaf plakların tipping hareketi ile diş kuronlarını kolayca devirdiği belirtilmektedir [106].

Kravitz ve ark., 2009 yılında yaptıkları çalışmalarında, şeffaf plaklar ile meziodistal devrilme hareketi için %41 doğruluk oranı bildirmişlerdir. Bu çalışmada en yüksek doğruluk laretal kesici dişlerde, en düşük doğruluk ise kanin dişlerde rapor edilmiştir [64].

Şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon sırasında kuvvet molar dişlerin direnç merkezinden uzaktan etki ettiği için dişlerde bukkal devrilme hareketi gerçekleşmektedir [107]. Klinik olgularda posterior dişlerin belirgin olarak negatif eğimli olduğu vakalarda, ilgili dişlerde kontrolsüz devrilme hareketi planlanabilmektedir [107]. Lombardo ve ark., vestibülolingual devrilme hareketinin %82.9 oranında öngörülebilir olduğunu bildirmiştir [108].

2012 yılında Darke ve ark., için gövdesel diş hareketi planlansa dahi bu hareketin genellikle kontrolsüz devrilme ile sonuçlandığını bildirmiştir [109].

Translasyon (Gövdesel hareket)

Translasyon, dişin kuronunun ve kökünün aynı yönde ve eşit mesafede hareket etmesi ile karakterizedir. Bu harekette, dişin eksen eğimi değişmemekte ve gövdesel olarak yer değiştirmektedir. Translasyon hareketinde, dişin rotasyon merkezinin teorik olarak sonsuzda yer aldığı kabul edilmektedir[104]. Bu hareketi gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 70-120 g olarak belirtilmektedir [32].

Bu tür bir hareketin gerçekleşebilmesi için kuvvetin dişin direnç merkezinden uygulanması gerekmektedir. Ancak, klinik pratikte kuvvetler braket seviyesinden uygulandığı için saf translasyon hareketi elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle hareketin gerçekleştirilebilmesi için kuvvet çifti uygulanmalıdır. Kontrollü tipping hareketine kıyasla translasyon hareketi, daha yüksek moment/kuvvet oranı gerektirmektedir. Literatürde 10:1 moment/kuvvet oranı bu hareket tipi için ideal kabul edilmektedir. Translasyon hareketi sırasında periodontal dokularda dengeli bir kuvvet dağılımı oluştuğu için bu dokuların daha kontröllü bir şekilde yeniden şekillenmesi sağlanmaktadır [104].

Şeffaf plaklarla translasyon (gövdesel hareket) elde etmek, düşük öngörülebilirliğe sahiptir. Bu nedenle yalnızca plakların uyguladığı kuvvete dayalı biyomekanik

prosedürlerle dişin gövdesel hareketini sağlamak, çoğu durumda sınırlı başarıyla sonuçlanmaktadır. Literatürde, üst molarların yaklaşık 2.4 mm kadar distalize edilebildiğini bildiren çalışmalar bulunmakla birlikte, bu tür hareketlerin elde edilebilmesi için uzun bir tedavi süreci ve yüksek düzeyde hasta kooperasyonu gerekmektedir [107].

Yapılan çalışmalar, şeffaf plakların premolar ve molar bölgede öngörülebilir gövdesel ekspansiyon gerçekleştiremediğini göstermektedir. Dijital tedavi planlamalarında genellikle gövdesel ekspansiyon gerçekçi olmayan şekilde yansıtılmakta ve planlanandan daha fazla devrilme hareketi gerçekleşmektedir [107].

Özellikle çekimli şeffaf plak tedavilerinde, köklerin paralel hareketinin sağlanabilmesi için ataşmanlardan destek alınmaktadır. Optimize kök kontrol ataşmanı premolar ve kanin dişlerine yerleştirilerek çekim boşluğunun gövdesel hareketle kapatılması önerilmektedir [96]. Simon ve ark., üst molar dişlerin distalizasyonunun ataşmanlarla desteklendiğinde %88 oranında gövdesel hareketle gerçekleştiğini rapor etmiştir [110].

Literatürde şeffaf plak tedavilerinde dişlerin devrilmesinin kontrolüne ilişkin çelişkili sonuçlar bulunmaktadır. Bu durumun, şeffaf plaklar ile kuvvet çifti oluşturmanın zor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kök kontrolünü daha iyi sağlayabilmek amacıyla plak geometrisinin değiştirilmesi ve uygun ataşmanların kullanılması gerekli görülmektedir [106].

Rotasyon

Bir dişte rotasyonun düzeltilmesi hedeflendiğinde, ilgili dişe kuvvet çifti uygulamak gerekmektedir. Rotasyon hareketinin gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 35-60 g olarak belirtilmektedir [32]. Bu durumda, direnç merkezinde herhangi bir net kuvvet oluşmamakta ve diş, sadece kendi eksenini etrafında dönmektedir [104].

Yuvarlak kron morfolojisine sahip premolar ve molar dişlerde rotasyon hareketinin düzeltilmesi, şeffaf plak tedavisinde en zor gerçekleştirilen hareket türlerinden olduğu belirtilmektedir. Bu tür vakalarda, hareketin kontrolünü artırmak ve kuvvet aktarımını optimize etmek amacıyla özel olarak tasarlanmış ataşmanlara ihtiyaç duyulmaktadır [107].

Şeffaf plaklarla rotasyon hareketi belirli bir dereceye kadar etkili şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu sınır genellikle 30–35 derece aralığında kabul edilmektedir. Eğer

bir dişteki rotasyon bu eşiğin üzerindeyse, şeffaf plak tedavisine başlamadan önce ön düzeltme uygulanması, hem tedavinin daha öngörülebilir ilerlemesini sağlayabilmekte hem de plak sayısının azalmasına katkıda bulunabilmektedir [96].

Kanin dişlerdeki rotasyon hareketine yönelik yapılan bir prospektif çalışmada, doğruluk oranı %36 olarak belirlenmiştir. İlgili dişlere interproksimal aşındırma uygulandığında bu oranın %43'e kadar yükseldiği bildirilmiştir [111].

Intrüzyon

Intrüzyon hareketi, dişin uzun eksen boyunca apikal yönde kontrollü bir şekilde hareket ettirilmesi ile karakterize edilmektedir. Intrüzyon, PDL'de yoğun ve lokalize bir kuvvet dağılımına neden olduğu için diğer hareket türlerine kıyasla en düşük kuvvet düzeyinde uygulanmalıdır. Kontrolsüz uygulandığı durumlarda PDL'de hyalinizasyon oluşmasına neden olarak hareketin gecikmesine veya kök rezorpsiyonu gibi yan etkilerin görülmesine neden olabilmektedir. Intrüzyon hareketinin gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 10-20 g olarak belirtilmektedir [32, 102, 112].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, şeffaf plak tedavisi sırasında plağın okluzal yüzeydeki kalınlığı, bite-block benzeri etki oluşturarak posterior bölgedeki dişlerin intrüzyonunu kolaylaştırdığı düşünülmektedir. Bu durum, özellikle ön dişlerin ekstrüzyonunun istenmediği tedavi planlamalarında avantaj olabilmektedir. Ancak, posterior bölgeye uygulanan intrüzyon kuvvetleri şeffaf plağın stabilitesini zorlaştırarak, anterior dişler ve plak arasında vertikal uyumsuzluklara neden olabilmektedir. Bu durumun engellenmesi için retansiyon sağlayabilmek amacıyla ataşmanların yerleştirilmesi önerilmektedir [107].

Öngörülebilir posterior intrüzyon miktarı 0.5-1.5 mm arasında belirtilmektedir. Bu sınırların üzerindeki hareketlerde, ek mekaniklerden destek alınması önerilmektedir [107].

Dijital olarak planlanan ve gerçekleşen diş pozisyonlarının dijital modelleri karşılaştırılarak yapılan şeffaf plaklar ile intrüzyonun değerlendirildiği bir çalışmada, intrüzyon hareketinin doğruluğunun en yüksek santral dişlerde, en düşük ise maksiller lateral kesici dişlerde olduğu rapor edilmiştir [106].

Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, dişin uzun eksenini boyunca koronal yönde hareket ettirilmesiyle karakterize bir ortodontik hareket türüdür. Ekstrüzyon hareketinde ideal olan, PDL içerisinde sadece gerilme kuvvetlerinin oluşmasıdır. Ancak, genellikle klinik uygulamalarda ekstrüze edilen dişin devrilmesi ile PDL içerisinde basınç, alanları da oluşabilmektedir. Ekstrüzyon sırasında kullanılan kuvvetlerin devrilme hareketinde önerilen düzeylerde tutulması hem kontrollü hareket hem de doku sağlığı açısından önem taşımaktadır. Ekstrüzyon hareketinin gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 35-60 g olarak belirtilmektedir [32].

Şeffaf plaklarla uygulanan ortodontik tedavilerde, ekstrüzyon hareketi yaklaşık %30'luk öngörülebilirlik oranıyla, en zor gerçekleştirilen diş hareketlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu durumun, şeffaf plakların ekstrüzyon kuvvetini oluşturmada zorlanmasından ve çiğneme kuvvetlerinin ters yönde uyguladığı kuvvetten kaynaklandığı düşünülmektedir [106]. İntrüzyon hareketinin zorluk derecesi, istenen ekstrüzyon miktarına bağlı olarak değişmekte olup; buton, elastik gibi ek mekaniklere ihtiyaç duyulabilmektedir [96].

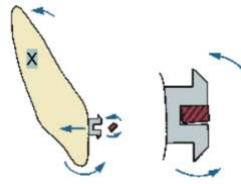
Tork

Tork, kuran pozisyonu sabit tutularak sadece kök ucunun hareket ettirilmesiyle elde edilen aksiyel eğim değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Bu hareket tipinde dişin dönme merkezi genellikle, kesici kenar ya da brakete yakın bir noktada yer almaktadır. Kök hareketinin sağlanabilmesi için uygulanan kuvvet çiftinin büyüklüğü diğer hareket türlerine göre daha yüksektir. Literatürde, M/F oranının 12:1 ve üzeri olması durumunda bu hareketin gerçekleşeceği bildirilmektedir [104].

Geleneksel ortodontik tedavide dikdörtgen bir telin burulması ile elde edilen kök hareketi tork olarak ifade edilmektedir. Kök pozisyonunu kontrol edebilmek için gereken çift moment, dikdörtgen kesitli bir telin aynı şekilde dikdörtgen yapıdaki braket slotuna yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Tel, braket içerisine yerleştirilirken burulma uygulanarak tork hareketi uygulanmaktadır. Tel ile braket arasındaki temas, telin köşelerine yakın noktalarda gerçekleşerek, moment kolunun kısa olmasına neden olmaktadır. Moment kolunun kısa olması, istenilen momentin üretilebilmesi için daha büyük kuvvetlerin uygulanmasını gerektirmektedir. Tork hareketinin gerçekleşmesi için optimum ortodontik kuvvet miktarı 50-100 g olarak belirtilmektedir. Slot boyutu,

telin kesiti, dişin pozisyonu, tel ve slot arasındaki boşluk gibi birçok faktör torkun hareketinin etkinliğini değiştirmektedir [32, 104].

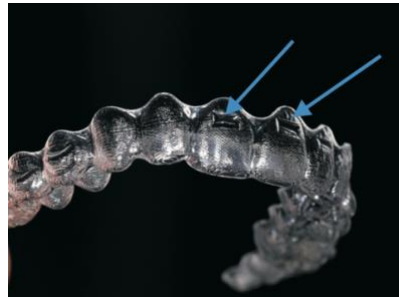
Tork hareketlerinde, diş kökünün hareket sınırlarını genellikle fasiyal ve lingual kortikal kemik belirlemektedir. Kökün bu sert yapılar üzerine sürekli olarak hareket ettirilmesi, dişin hareket hızını önemli ölçüde azaltmakta ve kök rezorpsiyonu riskini artırmaktadır. Bazı durumlarda kortikal kemiğin aşılması sonucu fenestrasyonlar görülebilmektedir [32].



Şekil 2.5: Sabit mekanikler ile keser dişe palatinal kök torkunun uygulanması [32]

Şeffaf plak tedavilerinde, özellikle üst kesici dişlerin lingual yönde kök torku uygulanabilmesi amacıyla “power ridge” olarak tanımlanan yapısal modifikasyonlar kullanılmaktadır. Bu sistemler, anterior bölgede minimal düzeyde tork gerektiren vakalarda etkili tork kontrolü sağlayabilmektedir. Ancak, sabit aparey sistemlerinde olduğu gibi, plak materyali ile diş yüzeyi arasında mevcut olan boşluk dijital planlamada öngörülen tork değerinin klinik olarak gerçekleşmesini engelleyebilmektedir. Bu nedenle, tedavi planlamaları yapılırken biyomekanik sınırlamalar göz önünde bulundurulmalıdır [96].

Simons ve ark., üst santral kesici dişlere tork uygulamasında power ridge ve ataşmanların biyomekanik katkısını değerlendirdikleri çalışmalarında yaklaşık 7-9°’lik tork kaybı meydana geldiğini rapor etmiştir [110].



Şekil 2.6: Şeffaf plaklarda power ridge uygulanması [113].

Molar dişlerde bukkolingual olarak kök kontrolü sağlamak ve bukkal kök torku oluşturulmasına yardımcı olmak amacıyla horizontal dikdörtgen ataşmanların

eklenmesi önerilmektedir [96]. Aynı zamanda, güncel bir yöntem olan optimize ekspansiyon destek ataşmanı da bu amaçla kullanılmaktadır [123]. Özellikle, ekspansiyon uygulanan tedavilerde molar dişlerin devrilmesini dengelemek amacıyla maksiller posterior dişlerde fazladan bukkal kök torku uygulanması önerilmektedir [96].

2.4 Şeffaf Plak Tedavileri

2.4.1 Tarihçe

Şeffaf plakların üretilmesindeki ilk yaklaşım, 1945 yılında Dr.Kesling tarafından geliştirilmiştir. Dr. Kesling, ortodontik tedavi sonrasında kullanılmak üzere, dişlerin konumunu korumaya yardımcı olan şeffaf, vakumla şekillendirilmiş bir aparey tasarlamıştır. Bu aparey, tedavisi tamamlanan hastanın modeli üzerinden hazırlanmakta ve yalnızca küçük miktarda diş hareketlerini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır [114]. Bu şeffaf apareylerin temel amacı, sabit ortodontik tedavisi tamamlanmış bireylerde dişlerin mevcut konumlarını korumak ve aynı zamanda küçük düzeltici hareketleri gerçekleştirmektir. Dr. Kesling, bu sistemlerin zamanla daha kapsamlı diş hareketleri için de kullanılabileceğini öngörmüştür [114]. 1993 yılında Sheridan, essix plakları kullanarak interproksimal aşındırma ve aşamalı düzeltme prensiplerini içeren yeni bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, her bir diş hareketi için ayrı bir model hazırlanması gerektiği için, uygulama süreci zaman alıcı olmuştur [114]. Bu yöntemle, yalnızca sınırlı düzeyde diş hareketi elde edilebilmekte olup, uygulanan hareketler genellikle 2–3 mm’lik küçük değişikliklerle sınırlı kalmaktadır [115].

Günümüzde kullanılan şeffaf plak sistemleri, Stanford Üniversitesi’nde iki yüksek lisans öğrencisinin üç boyutlu bilgisayar destekli modelleme teknolojisini kullanmasıyla geliştirilmiştir. Bu yöntemde, dijital ortamda simüle edilen diş hareket basamaklarına göre ardışık olarak termoplastik materyalden plaklar üretilmektedir. CAD-CAM teknolojisiyle tasarlanan ve genellikle poliüretan esaslı malzemelerden üretilen, hastanın kendisinin takip çıkarabildiği plaklardan oluşmaktadır [115]. Şeffaf plak tedavisinde, hastalardan alınan ölçüler, üç boyutlu olarak dijital ortama aktarılmakta ve bu veriler, özel yazılımlar aracılığıyla planlanan tedavi sürecine uygun şekilde analiz edilmektedir. Tedavi planına göre diş hareketlerini yönlendirecek seri plaklar dijital ortamda tasarlanarak üretilmektedir. Her bir plak, dişleri belirlenen hedef

pozisyona yönlendirecek biçimde tasarlanarak, küçük diş gruplarını ya da tek bir diş genellikle her 14 günde bir, yaklaşık 0,25–0,33 mm kadar hareket ettirecek şekilde programlanmaktadır. Bu şekilde, aşamalı ve kontrollü bir diş hareketi sağlanarak tedavi gerçekleştirilmektedir [64].

Şeffaf plak sisteminin, yalnızca hafif ve orta düzeydeki anterior çapraşıklıkları ve basit ortodontik sorunları çözmede etkili olduğu düşünülmekteydi [115]. Ancak, zamanla bilgisayar destekli planlama araçlarının gelişmesi ve plak materyallerinin biyomekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasıyla, şeffaf plakların daha kompleks vakalarda da etkin bir tedavi olabileceği gösterilmiştir [116, 117].

2.4.2 Şeffaf plak tedavi sistemleri

Invisalign Sistemi

1997 yılında Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, Calif), bilgisayar destekli tasarım/üretim (CAD/CAM) ve stereolitografi teknolojilerini kullanarak şeffaf plak tedavisini uygulanabilir bir yöntem haline getirerek literatüre tanıtmıştır. Bu sistem, poliüretan malzemeden üretilmiş çıkarılabilir şeffaf plaklardan oluşmaktadır ve geleneksel tedavilere estetik bir alternatif sunmaktadır. Kişiyi özel olarak üretilen her plak, 0.25 ile 0.33 mm diş hareketi sağlayacak şekilde programlanmıştır. Geleneksel yöntemlere kıyasla Invisalign® estetik görünüm, hasta konforunun artması, oral hijyenin iyileştirilmesi, daha kısa randevu süresi ve diş hareketlerinin 3D kontrolü gibi avantajlar sunarak ortodontik tedaviye talebi artırmıştır [64, 65].

Hastadan alınan ölçü veya taramalarla oluşturulan dijital model üzerinde bilgisayar destekli üç boyutlu simülasyon yazılımları (ClinCheck®) kullanılarak sanal tedavi planı hazırlanmaktadır [118]. Hazırlanan tedavi planına göre, her aşamaya karşılık gelen şeffaf plaklar CAD/CAM destekli yöntemler ile üretilmektedir [119]. Üretilen şeffaf plaklar, diş yüzeylerine uygulandığında plak diş yüzeylerine farklı noktalardan basınç uygulayarak, diş yeni konumuna doğru itmektedir [118].

Şeffaf plak tedavilerinde, her plak 0.25 mm'lik lineer diş hareketi, 2°'lik rotasyonel düzeltme ve 1°'lik tork hareketi gerçekleştirecek şekilde tasarlanmaktadır. Hareket miktarı klinik tercihlere göre değiştirilebilmektedir. Şeffaf plaklar, hareket miktarı ve türüne göre 7, 10 veya 14 günlük değişim protokolleriyle kullanılmaktadır [105].

Bununla birlikte, tedavinin başarısı büyük ölçüde hastanın kooperasyonuna bağlıdır ve hastanın plaklarını günde 20-22 saat kullanması gerekmektedir [118].

ClearCorrect Sistemi

ClearCorrect, dijital planlama ile desteklenen ve ardışık plaklar kullanarak kademeli diş hareketi sağlayan şeffaf plak sistemlerinden biridir [120]. Tedavi planlaması web tabanlı ClearPilot yazılımı ile yapılmaktadır. ClearPilot yazılımıyla, diş hareketlerinin üç boyutlu simülasyonu ve tedavi hedefleri görselleştirilebilmektedir [121]. ClearCorrect Plakları, hastadan alınan dijital ölçüler ile elde edilen üç boyutlu görüntülerin Stratasys Objet gibi yazıcılarda basılması ve bu modellerin üzerine termoplastik malzemenin vakumla şekillendirilmesiyle üretilmektedir [122].

Her plak, optimal diş hareketinin sağlanması için günde yaklaşık 22 saat kullanılmakta ve genellikle 2 haftalık kullanımın ardından yeni plağa geçilmektedir [123]. Zor gerçekleşen diş hareketlerinde, plağın tutuculuğunu arttırmak ve diş hareketini kolaylaştırmak amacıyla diş yüzeylerine küçük kompozit çıkıntılar olan “engager” eklenmektedir [124].

2.4.3 Şeffaf plak tedavi aşamaları

Şeffaf plak tedavisinde, geleneksel tedavi yöntemlerine benzer şekilde, verilerin toplanması, doğru tanının belirlenmesi ve kişiye özgü ortodontik tedavi planının oluşturulması ile tedavi sürecine başlanmaktadır. Tedavi planı ClinCheck gibi bir yazılım üzerinden görselleştirilmektedir. Ortodontistler, bireysel tedavi planına uygun olacak şekilde gerekli düzenlemeleri yaparak tedavi planını onaylamaktadır. Tedavi planının onaylanmasının ardından, diş hareketlerine göre aşamalandırılmış olan şeffaf plaklar üretilip hekime iletilmektedir [96].

Kayıtların Toplanması

Ortodontik tedavi öncesinde değerlendirme sürecinde rutin olarak kullanılan kayıtlar arasında dental modeller, intraoral ve ekstraoral fotoğraflar, panoramik ve lateral sefalometrik röntgenler yer almaktadır. Tanıyı desteklemek amacıyla periapikal, el bilek ve posteroanterior sefalometrik röntgenler, konik ışınli bilgisayarlı tomografi, manyetik rezonans görüntüleme gibi ileri düzey radyolojik ve klinik kayıtlar da kullanılabilmektedir [32, 96].

Güncel tedavilerde, alçı modellerin yerini intraoral tarayıcılar almaktadır. Literatürde, dijital modellerin tekrarlanabilirlik avantajıyla birlikte, alçı modeller kadar güvenilir olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur [107]. Günümüzde kayıt toplamak amacıyla diş hekimliğinde sıklıkla tercih edilen dijital tarama cihazları arasında; iTero (Align Technologies) , Lava COS (3M ESPE), Trios (3Shape) sistemleri yer almaktadır [125].

Tedavi Planının Oluşturulması

Şeffaf plak tedavilerinde dijital planlama süreci, hastadan alınan kayıtların dijital ortama aktarılmasıyla başlamaktadır. Bu aşamada, dijital ortama aktarılan veriler doğrultusunda hastanın mevcut dental ve iskeletsel durumu analiz edilerek tedavi hedefleri belirlenmektedir. Belirlenen bu hedefler, dijital planlama yazılımları (ClinCheck, ClearPilot) aracılığıyla çevrimiçi reçete formları kullanılarak teknisyene iletilmektedir. Dişlerin, final oklüzyona ulaşana kadar gerçekleştireceği hareketleri gösteren tedavi planı hekime sunulmaktadır. Hekim, tarafına gönderilen planı değerlendirerek gerekli gördüğü diş hareketlerini ve final düzeltmeleri yapabilmektedir. Dijital yazılım sayesinde, birden fazla tedavi alternatifi oluşturulabilmekte ve bu alternatifler süre, hareket zorluğu ve final oklüzyon açısından değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, tedavi planı hasta ile de dijital olarak paylaşılabilmektedir [96].

Klinik Uygulama

Şeffaf plakların tedavisinin başlangıç seansı, sabit ortodontik tedavideki braketlerin yapıştırılması seansıya benzerlik göstermektedir. Tedaviye adaptasyon sürecini kolaylaştırmak ve hastaya plakların kullanımı ile ilgili gerekli ağız hijyeni alışkanlıklarını kazandırmak amacıyla, ataşmanların uygulanmasının ileri seanslara ertelenmesi önerilmektedir [96].

Şeffaf plak tedavisi sürecinde; maloklüzyonun türü, programlanan diş hareketleri ve tercih edilen şeffaf plak sistemine bağlı olarak haftalık ya da iki haftalık değişim protokolleri kullanılmaktadır [96].

İlk plak serisi tamamlandıktan sonra, hekim tedavi hedeflerine ulaşamazsa, ek plak serisi talep edilebilmektedir. Bu durumda, başlangıç seansında olduğu gibi yeni kayıtlar alınarak plak üretim süreci yeniden başlatılmaktadır [96].

2.4.4 Şeffaf plakların materyal özellikleri

Şeffaf plaklar; poliüretan, polietilen tereftalat (PET), polietilen tereftalat glikol (PET-G) ve polivinil klorür gibi termoplastik reçine esaslı polimerlerden üretilmektedir. Bu polimer yapılar ağız içerisindeki ısı, nem, sürekli uygulanan kuvvetler ve ağız sıvıları gibi faktörlere karşı reaktif özellikler gösterebilmektedir. Bu nedenle, üretim sürecinden kaynaklanan değişimler veya intraoral ortamla temas sonrası gerçekleşen bozulmalar, plak materyalinin fiziksel ve mekanik dayanımını olumsuz etkileyerek tedavi etkinliğini azaltabilmektedir [126].

Şeffaf plaklar, tükürük ile temasta olduğu için su absorpsiyonu mekanik özelliklerini etkilemektedir. Termoplastik poliüretan ve PET-G amorf yapıları ve düşük molekül yoğunlukları nedeniyle su absorpsiyonu göstermektedir. Su polimer zincirlerindeki bağlantıları zayıflatarak materyalin özelliklerini olumsuz etkilemektedir [107].

Şeffaf plaklar, üretim süreci termoformlama yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlemde kullanılan SmartTrack (LD30; Align Technology) materyali, çok katmanlı bir termoplastik yapıya sahiptir ve ortodontik uygulamalar için özel olarak geliştirilmiş polimer sistemidir [127].

SmartTrack materyalinin özellikleri:

- Hafif ve sabit kuvvet iletimi sağlamak
- Esnek yapısı nedeniyle daha uzun süre kuvvet uygulayabilmek
- Dişlere daha iyi adaptasyon sağlamak
- Plakların takılıp çıkarılması daha kolay gerçekleştirmek [105].

Termoplastik polimerler üretim sürecindeki şekillendirme, soğutma ve kesim gibi işlemlerden etkilenebilmektedir. SmartTrack materyalinin termoformlama sonrası hedeflenen kalınlığı 0.762 mm olarak belirtilmiştir. Mantovani ve ark., gerçekleştirdikleri çalışmada Invisalign® plak materyalinin termoformlama sonrası kalınlığının homojen olmadığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen veriler, termoformlama sonrasında plak kalınlığının; kesici diş bölgesinde 0.582–0.639 mm, kanin bölgesinde 0.569–0.644 mm ve molar bölgesinde 0.566–0.634 mm arasında değiştiğini göstermiştir. Özellikle molar bölgede, gingival düzeydeki plak kalınlığının oklüzal bölgeye kıyasla daha ince olduğunu ve bu durumun molar dişlerin

bukkolingual inklinasyonunun kontrolünü olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir [127].

2.4.5 Şeffaf plaklar ile sabit ortodontik tedavinin karşılaştırılması

Şeffaf plak tedavisi, ortodontik kuvvetlerin iletiminde sabit apareylerden farklı bir biyomekanik yaklaşım sunarak itme kuvveti ile hareketleri gerçekleştirmektedir. Kuvvet aktarımı, ankraj kontrolü ve diş hareketi yönünden plak sistemlerinin sabit mekaniklere göre farklı özellikleri bulunmakta olup, bu farklılıklar tedavi planlamasında dikkate alınmalıdır. Özellikle, vertikal kontrol ve ankraj yönetimi gibi alanlarda avantaj sağlaması, bazı maloklüzyonlarda şeffaf plakların sabit sistemlere kıyasla daha etkili bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bir vakanın sabit apareylerle mi yoksa şeffaf plaklarla mı tedavi edileceğine karar verirken, şeffaf plaklarla sabit apareyler arasındaki benzerlikleri ve farkları iyi anlamak, şeffaf plak sisteminin sınırlı ve güçlü yönlerini değerlendirmek önem taşımaktadır [96].

İki sistem arasındaki temel fark, sabit ortodontik mekaniklerin dişleri çekerek, şeffaf plakların ise iterek hareket ettirmesidir. Şeffaf plaklarda yer alan diş pozisyonları, hedeflenen hareketi oluşturmak üzere mevcut diş konumlarından farklı pozisyonda bulunmaktadır. Şeffaf plak, dişlere hafif bir deformasyonla oturur ve plak materyalinin elastik özellikleri sayesinde, dişlere hareket yönünde itme kuvveti uygulanır [96].

Sabit ortodontik tedavilerde diş hareketi, braket slotuna yerleştirilen ark telleri aracılığıyla sağlanırken, şeffaf plak sistemlerinde plak materyalinin dişin yüzeyini sarması ile kuvvet iletimi gerçekleştirilmektedir. Dişin yüzey alanı arttıkça, plakla temas eden alan da genişlemekte ve buna bağlı olarak kuvvet aktarımının etkinliği artmaktadır. Özellikle uzun klinik kurona ve geniş yüzey alanına sahip dişlerde, şeffaf plakların oluşturduğu hareketler daha kontrollü ve öngörülebilir şekilde gerçekleşmektedir [96].

Sabit ortodontik tedavilerde ankraj kontrolü genellikle resiprokal ankraj prensibine dayanır ve ek mekanikler kullanılmadığı sürece ankraj kayıpları görülebilmektedir. Buna karşılık, şeffaf plak tedavisinde ankraj kontrolü dijital planlama ile aşamalı olarak yönetilebilmektedir. Bu sistemde, bazı dişler tedavinin belirli aşamalarında hareket ettirilmeyle aktif ankraj birimi olarak görev yapabilir ve istenilen diş hareketlerinin kontrollü şekilde gerçekleşmesine olanak sağlayabilir [96].

Sabit ortodontik tedavilerde, kuvvet direnç merkezinin anteriorundan uygulandığı için kesici dişlerde proklinasyon gözlemlenmektedir. Şeffaf plakların, proklinasyonu kontrol etmede daha başarılı olduğu belirtilmektedir. Özellikle, ClinCheck yazılımında kesici dişlerde proklinasyon istenmediği takdirde, bu durum dijital olarak düzenlenebilmektedir [96, 128].

Sabit ortodontik tedavide klinisyen, hastanın tedaviye verdiği yanıtı göre karar alarak ve süreci reaktif şekilde yönetmektedir. Buna karşılık, şeffaf plak tedavisi daha planlı ve proaktif bir yaklaşım gerektirmektedir. Tedavi başlamadan önce tüm diş hareketleri dijital ortamda aşamalı olarak planlanmakta ve hedeflenen final oklüzyona göre yönlendirilmektedir. Bu sayede, klinisyenin tedavi sürecine daha disiplinli ve öngörülebilir biçimde yaklaşmasını sağlayacağı düşünülmektedir [96].

Şeffaf plaklarla uygulanan ortodontik tedavide, sabit apareylere kıyasla daha düşük düzeyde ağrı oluştuğunu bildiren çalışmalar mevcuttur [129, 130]. Ancak Shalish ve ark., şeffaf plak kullanan hastaların ağrı düzeylerinin sabit ortodontik tedavi gören hastalara göre anlamlı ölçüde daha yüksek olduğunu rapor etmiştir [131]. Gao ve ark., ortodontik ağrı düzeyinin zamanla azaldığını ancak bu değişimin tedavi yönteminden bağımsız olduğunu belirtmiştir [132]. Bu nedenle, mevcut literatürde iki tedavi yöntemi arasında ağrı algısı açısından net bir görüş birliği bulunmamaktadır.

Şeffaf plak tedavilerinde, kök rezorpsiyonu oranlarının daha düşük olduğuna dair çeşitli çalışmalar mevcuttur [133, 134]. Ancak Al Zainal ve ark., şeffaf plakların ortodontik tedaviye bağlı kök rezorpsiyonunu önlemede etkili olmadığını ifade etmiştir [135]. Mertoğlu ve ark., sabit ortodontik tedavi grubunda daha belirgin olmak üzere her iki tedavi yönteminde de kök rezorpsiyonu görüldüğünü rapor etmiştir [136].

Bazı araştırmalarda, sabit apareyler ile şeffaf plaklar karşılaştırıldığında, şeffaf plak kullanan bireylerin periodontal sağlık açısından daha olumlu sonuçlar elde ettiği bildirilmiştir [136]. Ancak literatürde, iki tedavi yöntemi arasında periodontal sağlık bakımından anlamlı bir fark gözlemlenmediğini rapor eder çalışmalar da mevcuttur [137].

Bazı çalışmalar, şeffaf plak tedavisi ile çekimsiz vakalarda dişlerin inklinasyonlarının korunmasında etkili olduğunu belirtmiştir [138]. Ancak retansiyon aşamasında şeffaf plak tedavisinde sabit ortodontik tedaviye göre daha fazla relaps rapor edilmiştir [139].

Sabit ortodontik tedavilerde dişlerin intrüzyon veya ekstrüzyonu, farklı bükümlerle daha hassas şekilde kontrol edilebilmektedir. Şeffaf plak tedavisinde ise özellikle ekstrüzyon hareketi daha zor gerçekleşmektedir. Ayrıca plakların dişlerin oklüzal yüzeyini kaplaması interdijitasyonun tam olarak sağlanmasını engelleyebilmektedir [128].

Kemik rezorpsiyonunun 7–14 gün sürdüğü ve benzer sürede periodontal dokularda yeniden şekillenmenin gerçekleştiği göz önüne alındığında, ortodontik kuvvetlerin üç haftadan daha kısa aralıklarla aktive edilmemesi önerilmektedir [32]. Şeffaf plakların iki haftada bir değiştirilerek uygulanması, bu iyileşme sürecini kesintiye uğratarak alveolar kemikte doku hasarına yol açabileceği düşünülmektedir [128].

Zheng ve ark., çekimsiz vakalarda şeffaf plakların klinikte geçen zaman ve toplam tedavi süresi açısından sabit tedavilere göre daha üstün olduğunu bildirmiştir [140]. Li ve ark. ise, diş çekimli vakalarda şeffaf plaklarla gerçekleştirilen tedavi süresinin %44 oranında daha uzun sürdüğünü rapor etmiştir [141].

Şeffaf plaklar ve sabit ortodontik tedavilerin her ikisi de maloklüzyon tedavisinde etkili tedavi seçenekleridir. Şeffaf plaklar, özellikle segmental diş hareketlerinde etkinlik sağlamaları ve tedavi süresini kısaltmaları açısından avantaj sunmaktadır. Buna karşın sabit apareyler; daha geniş kapsamlı düzeltmeler yapılmasına olanak tanınması, yeterli oklüzal temasların oluşturulması, diş torkunun daha iyi kontrol edilmesi, transversal genişliğin artırılması ve tedavi sonrası retansiyonda daha başarılı sonuçlar vermesiyle öne çıkmaktadır. Bu nedenle, tedavi planlamasında her iki sistemin avantaj ve sınırlılıkları göz önünde bulundurularak hasta özelinde en uygun yaklaşım belirlenmelidir [128].

2.4.6 Endikasyonlar ve kontrendikasyonlar

Endikasyonlar

- Hafif–orta dereceli diş çapraşıklıkları veya diastemalar (1-5 mm)
- Keser rotasyonu [142, 143]
- Dental darlık vakaları
- Molar dişlerde sınırlı distalizasyon gerektiren vakalar
- 1-2 dişin intrüzyonunu gerektiren hastalar

- Büyüme gelişimi tamamlanmış daimi dişlenmesi mevcut hastalar
- Alt kesici diş çekimi ile tedavi planlanan hastalar
- Ortodontik tedavi görmüş ancak relaps gösteren hastalar [115]

Kontrendikasyonlar

- Şiddetli çapraşıklık veya geniş diastemalar (>5 mm)
- Şiddetli iskeletsel uyumsuzluklar
- Sentrik ilişki-sentrik oklüzyon uyumsuzluğu olan vakalar
- Şiddetli Rotasyonlar (>20°)
- Aşırı devrilmiş dişler (>45°)
- Kısa klinik kuran boyuna sahip dişler
- Hasta kooperasiyonunun yetersiz olduğu durumlar
- Çok sayıda diş eksikliği [114, 115]

2.4.7 Avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar

- Estetik görünüm [144]
- Hasta konforunun artması [144]
- Ağız hijyeni ve periodontal sağlık [145]
- Çürük ve white spot lezyonu riskinin azalması [146]
- Daha az klinik ziyaret [147]
- Bazı vakalarda daha kısa tedavi süresi [128]

Dezavantajlar

- Kompleks vakalarda kısıtlı etki [144]
- Hasta kooperasyonuna bağlı tedavi süreci [118]
- Biyomekanik kısıtlılıklar [148]
- Okluzal uyum ve finishing problemleri [128]

- Maliyet ve erişilebilirlik [147]

2.4.8 Ataşmanlar

Şeffaf plak sistemlerinde planlanan diş hareketini gerçekleştirebilmek için plağın elastisitesinden ve ataşmanlardan destek alınmaktadır. Ayrıca, ataşmanlar şeffaf plağın retansiyonunu sağlamak için de kullanılmaktadır. Plağın etkinliğini arttırmak için kompozit ataşmanların dişlere yapıştırılması ve şeffaf plağın retansiyonunun artması, diş hareketini kolaylaştırmaktadır [65].

Konvansiyonel Ataşmanlar

Konvansiyonel ataşmanlar, plağın retansiyonunu artırmak için kullanılan pasif ataşmanlardır. Plakların, diş hareketini uygulayabilmesi için retansiyon noktası olarak işlev görerek hareketlerin dişe iletilmesini kolaylaştırmaktadır. Konvansiyonel ataşmanlar üç tipte sınıflandırılmaktadır [96, 105].

Elipsoid Ataşmanlar: Retansiyon ve ankraji artırmak amacıyla özellikle diş yüzey alanının sınırlı olduğu durumlarda tercih edilen pasif ataşmanlardır [96, 105].

Dikdörtgen Ataşmanlar: Genellikle diş krununun ortasına verikal veya horizontal olarak yerleştirilen pasif ataşmanlardır.

- Verikal Dikdörtgen Ataşman: Şeffaf plak tedavilerinde kök kontrolü sağlamak amacıyla yerleştirilen ataşmanlardır. Optimize kök kontrol ataşmanı yerleştirelemeyen durumlarda kök kontrolünü sağlayabilmek için tercih edilebilmektedir [96, 105].
- Horizontal Dikdörtgen Ataşman: Krun boyu kısa dişlerde veya okluzal interferans varlığında retansiyon amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca bukkolingual olarak molar dişlerin kök kontrolünü sağlamak ve bukkal kök torku elde etmek amacıyla kullanılmaktadır [96].
- Eğimli Ataşmanlar: Vertikal ve horizontal dikdörtgen ataşmanlar eğimli olarak da tasarlanabilmektedir. Ataşmanın eğimli yüzeyi aktif yüzeydir ve diş hareketinin gerçekleştirilebilmesi için plağın kuvvet uygulayacağı düz bir yüzey sağlamaktadır. Molar dişlerde ekstrüzyon hareketi için gingival eğimli, intrüzyon hareketi için ise okluzal eğimli horizontal ataşmanlar kullanılmaktadır [96, 105].

Karras ve ark., ataşmanların verimliliğini değerlendirdikleri bir makalede, daha büyük ataşmanın daha geniş bir yüzel alanı sağlayarak etkinliğini arttırdığını bildirmiştir [149].

Optimize Ataşmanlar

Yazılım tarafından belirli bir diş hareketi eşiği algılandığında sisteme otomatik olarak optimize ataşmanlar yerleştirilmektedir. Optimize ataşmanlar, daha öngörülebilir hareket elde etmek amacıyla optimal kuvveti iletmeyi hedeflemektedir [105]. Bu ataşmanlar dişe göre özelleştirilerek uygulanan kuvvetin yönünü, büyüklüğünü ve uygulama noktasını kontrol etmek amacıyla tasarlanmaktadır [96].

Optimize ataşmanlar, dişin anatomik yapısına bağlı olarak değişen aktif yüzey geometrilerine sahiptir. Şeffaf plaklar bu yüzeylere dar bir açıyla temas edecek şekilde tasarlanarak, aktif yüzeylere etkin kuvvet iletiminin sağlanması amaçlanmaktadır. Ataşmanın boyutu ile plak içerisindeki ataşman boşluğu birbirinde farklıdır. Optimize ataşmanın yeniden yerleştirilmesi gerektiği durumlarda, aktif plak değil ataşman şablonu kullanılmalıdır [96].

Günümüzde, belirli bir diş hareketi eşik değeri karşılanmasa dahi, klinisyenler tarafından optimize ataşmanların eklenmesi talep edilebilmektedir [105].

Molar dişler haricindeki dişlerde kullanılan optimize ataşman türleri [105]:

- Optimize rotasyon ataşmanı
- Optimize ekstrüzyon ataşmanı
- Optimize kök kontrol ataşmanı
- Üst lateral dişler için optimize edilmiş ataşman
- Çok düzlemli ataşman
- Optimize destek ataşmanı

Molar dişlerde kullanılan optimize ataşmanlar [105]:

- Çok düzlemli ataşman: Aynı anda hem rotasyon hareketi ($\geq 5^\circ$) hem de vertikal hareket (≥ 0.5 mm) planlanan diş hareketlerinde kullanılmaktadır.

- Optimize ekstrüzyon ataşmanı: Hareket miktarı olarak 0.5 mm’de fazla ekstrüzyon ve 5°’den daha az rotasyon düzeltimi olan molar dişlerde ekstrüzyonu desteklemek amacıyla kullanılmaktadır.
- Optimize ekspansiyon destek ataşmanı: Molar ve premolarlarda ekspansiyon hareketini desteklemek amacıyla yatay kubbe şeklinde tasarlanmış ataşmanlardır.

2.5 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi, bir sistemin dış kuvvetlere karşı gösterdiği tepkilerin değerlendirilmesinde kullanılan matematiksel analiz yöntemidir. Bu yöntem, biyomekanik sistemlerin matematiksel modellerinin oluşturulması ve bu modellerin bilgisayar destekli bir program aracılığıyla analiz edilmesi ile gerçekleştirilmektedir.[150, 151].

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık geometriye sahip yapıları, sistemin küçük bileşenlerine ayırarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, problemi temel düzeyde anlamayı kolaylaştırmakta ve dijital olarak aynı koşullar altında tekrarlanabilir analizler yapılmasını sağlamaktadır [151].

Sonlu elemanlar analizi, 1960’lı yılların başlarında havacılık ve uzay endüstrisinde yapısal problemleri çözmek amacıyla geliştirilmiş bir mühendislik yöntemidir [151]. Bu teknik, diş hekimliğinde ilk kez 1960’ların sonunda Ledley ve Huang tarafından uygulanmaya başlanmıştır. 1970’li yıllarda ise Farah ve ark.nın gerçekleştirdiği araştırmalarla, dental uygulama alanlarında daha fazla kullanılmaya başlanmıştır [151-153].

Sonlu elemanlar analizi hem iki boyutlu hem de üç boyutlu olarak uygulanabilmektedir. Karmaşık yapısal özellik gösteren modellerde, iki boyutlu analizler sınırlı kalabildiği için bu durumlarda üç boyutlu analizler tercih edilmektedir. Analiz sürecindeki ilk aşama, incelenecek yapının gerçeğe uygun geometrik modelinin oluşturulmasıdır [154]. Analizin gerçekleştirilebilmesi için modeli oluşturulacak yapıların elastisite modülü ve Poisson oranı gibi mekanik özelliklerinin analiz yazılımına tanımlanması gerekmektedir [155].

Sonlu elemanlar analizinde; gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme gibi ölçümler sayısal verilere dönüştürülerek ve renk haritalarıyla ifade edilerek yorumlanmaktadır.

Özellikle, karmaşık geometrilere ve farklı yapısal özelliklere sahip sistemlerin analizinde etkili bir yöntemdir. Aynı koşullarda tekrarlanabilen bir sistem olması bu yöntemin güvenilirliğini artırmaktadır. Ancak bu yöntemin verimli kullanılabilmesi için analiz sürecinde yer alan bazı temel kavramların iyi bilinmesi gerekmektedir [151, 155].

2.5.1 Sonlu elemanlar analizi ile ilgili kavramlar

Eleman

Elemanlar, sistemlerin bölünmesiyle oluşturulan daha basit ve küçük geometrik parçalardır ve sonlu sayıda elemanlar birleştirilerek matematiksel denklemler elde edilmektedir. Eleman boyutlarının küçük ve fazla sayıda olması gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesini sağlarken hata ihtimalini de artırmaktadır [151, 155]. Elemanlar; geometrisine, boyutuna, düğüm sayısına, ve problemin özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır [156, 157].

Düğüm

Elemanların birbirleriyle birleştiği köşe noktası düğüm olarak tanımlanmaktadır. Düğümler aracılığıyla elemandaki fiziksel değişimler başka bir elemana aktarılmaktadır. Belirlenen düğümlerin bilgisayar programına aktarılmasında X, Y ve Z koordinat sistemi kullanılmaktadır [158]. Katı modellerde düğüm noktalarındaki yer değişiklikleri elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu elemanlar analizi ile düğüm noktalarındaki yer değişiklikleri çözümlenerek hesaplanmaktadır [155].

Ağ yapısı

Bir modelden eleman adı verilen daha küçük parçalara ayrılması işlemi “ağ yapısı oluşturulması” olarak isimlendirilmektedir. Ağ yapısı oluşturma aşaması ile eleman ve düğüm noktalarının koordinatları belirlenmektedir [158].

Kuvvet

Hareket eden bir cismi durduran veya duran bir cismi hareket ettiren ve cisimlerin şekil, yön ve doğrultularını değiştiren vektörel büyüklük kuvvet olarak tanımlanmıştır [159]. Kuvvet (F) : Kütle (m) $\times$ ivme (a) olarak formüle edilmektedir. Mekanik kuvvet birimi genellikle Newton olarak kullanılmaktadır. Ortodonti literatüründe ise kuvvet genellikle “gram-kuvvet (gf)” olarak kullanılmaktadır. 1 newton 101.97 gram-force olarak hesaplanmaktadır [160].

Elastisite Modülü (Young's Modülü)

Elastisite modülü, bir cismin elastikiyet sınırları içinde gerilme/gerinim oranını ifade etmektedir [161]. Elastisite modülü materyallere göre değişmekte ve bu oranın değeri arttıkça cismin deformasyona gösterdiği direnç artmaktadır. Oranı yüksek olan cisim, düşük olana göre aynı kuvvet altında daha az deformasyon göstermektedir [104].

Poisson Oranı

Cisimlerin çekme veya basma kuvvetleri altında eninde oluşan birim uzamanın, boyunda oluşan birim uzamaya oranı Poisson oranı olarak ifade edilmektedir. Bir cisme basma kuvveti uygulandığında kuvvetin uygulandığı yönde boyunun kısalması, kuvvete dik olan diğer boyutta ise boyunun uzaması gerçekleşmektedir. Tam tersi şekilde çekme kuvvetleri altında ise cismin eni kısılırken boyu uzamaktadır [162]. Yumuşak olan materyallerin Poisson oranı, diğer materyallere göre daha yüksektir [163].

Poisson Oranı = Endeki birim uzama / Boydaki birim uzama, şeklinde formüle edilmektedir [162].

Stres (Gerilme)

Stres, bir cismin üzerine uygulanan kuvvet sonucu cismin birim alanda kuvvete karşı oluşturduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Cismin tepkisi kuvvetle eşit şiddetle olmakla birlikte ters yönde oluşmaktadır.

σ (Stres, pascal) = F (newton) / A (m^2 , mm^2) olarak formüle edilmektedir.

Yunan sigma sembolü (σ) ile temsil edilen stres birim olarak genellikle “n/m²” ve P (pascal) olarak kullanılmaktadır. Ancak diş hekimliği literatüründe incelenen boyutların milimetrik olması nedeniyle mega paskal (MPa) daha sık kullanılmaktadır (1MPa=10⁶Pa) [162, 164].

Uygulanan kuvvete göre 3 farklı tipte gerilme oluşabilmektedir;

- Sıkışma Gerilmesi: Bir cisme aynı doğrultuda ve aynı yönde iki kuvvetin oluşturduğu strestir. Bu stres tipinin etkisiyle cismin molekülleri birbirine yaklaşmaktadır.

- Çekme Gerilmesi: Bir cisme aynı doğrultuda fakat ters yönde iki kuvvetin oluşturduğu strestir. Bu stres tipinin etkisiyle cismin molekülleri birbirinden uzaklaşmakta ve bütünlüğü bozulmaktadır.
- Makaslama Gerilmesi: Bir cisme farklı düzlemde ve ters yönde iki paralel kuvvet uygulandığında meydana gelen stres türüdür. Bu stres tipinin etkisiyle cismin molekülleri birbiri üzerinde paralel yönde kaymaya zorlanmaktadır [165].

Asal gerilme (Principal stress)

Üç boyutlu elemanlarda makaslama gerilimlerinin her düzlemde sıfır olduğu ve bütün gerilmelerin bölgeye dik yönde oluşan basma ve çekme gerilmelerinden meydana geldiği gerilmeler asal gerilme olarak ifade edilmektedir. Porselen ve kemik gibi kırılğan materyaller için asal gerilim değerleri kullanılmaktadır. Sıkışma ve çekme streslerinin dağılımı asal gerilme dağılımına göre değerlendirilmektedir. Maksimum asal gerilme, intermediat asal gerilme ve minimum asal gerilme olmak üzere üç tipi bulunmaktadır. Kuvvet uygulanan cisimlerde genellikle bileşik gerilme görülmektedir ve üç gerilme tipinin birlikte bulunduğu gerilme tipini ifade etmektedir.

- Maksimum asal gerilme (Maximum principal): En yüksek çekme gerilmelerini ifade eden pozitif değerdir.
- Minimum asal gerilme (Minimum principal): En yüksek basma gerilmelerini ifade eden negatif değerdir [162].

Stres elemanındaki düğüm noktasında mutlak değeri yüksek olan stres tipinin etkisi daha belirgindir [152, 162, 166]. Yani, cisimdeki düğüm noktasında sıkışma tipi stres 80 Mpa, gerilme tipi stres -20 Mpa olduğunda, belirtilen düğüm noktasında sıkışma tipi stres daha belirgindir. Bu durumda değerlendirilmesi gereken asıl stres türü sıkışma tipi strestir.

Von Mises Gerilmesi (Von Mises Stress)

Bir cismin akma veya kırılma gösterip göstermeyeceğini belirlemek amacıyla Von mises gerilim değeri kullanılmaktadır. Genellikle titanyum gibi sünek materyaller için kullanılarak cismin üzerindeki yoğunluk ve gerilme dağılımları hakkında bilgi almak amacıyla kullanılmaktadır. Von Mises gerilmeleri iki veya üç boyutta oluşan çoklu gerilmeleri birleştirerek ve tek yönde yüklenerek cismin stress direncini

belirtmektedir. Cismin üzerinde meydana gelen basınç dağılımı bir renk ölçeği ile belirtilmektedir [167]. Cismin bir bölümündeki iç enerji, belirli bir değeri aştığında cisim bu noktada şekil değiştirmektedir. Von mises stres ise şekil değiştirme enerjisi olarak ifade edilen enerji formudur [166].

Strain (Gerinim)

Kuvvet altındaki bir cismin, başlangıç durumuna kıyasla şekil değiştirme miktarı gerinim olarak ifade edilmektedir. Kuvvet altındaki cismin ,birim boyutunda oluşan şekil değişimi gerinim olarak tanımlanmaktadır. Bu şekil değişimi niceliksel bir değişimdir ve bir cismin şekil değişiminin matematiksel olarak belirtilebilmesini sağlamaktadır [162, 168].

Gerinim (strain) = Uzunluktaki Değişim / Orijinal Uzunluk şeklinde formüle edilmektedir [157].

Elastik Sınır

Kuvvet altındaki bir cismin, plastik deformasyon göstermediği maksimum gerilme elastik sınır olarak ifade edilmektedir. Cismin plastik özellik göstermediği maksimum yük-esneme limiti şeklinde tanımlanmaktadır [104].

Rijit Eleman

Deformasyona uğramadan kuvveti ileten ve stres yüklenmeyen elemanlar, rijit eleman olarak tanımlanmaktadır. Bağlı oldukları düğümler arasındaki mesafenin sabit tutulmasında kullanılmaktadır [156, 157].

İzotropik Cisim

Kuvvet altında her noktada ve farklı doğrultularda aynı elastik özellik gösteren cisimler izotropik cisim olarak tanımlanmaktadır. Yani X, Y ve Z eksenlerinden herhangi birinden kuvvet uygulandığında izotropik cisimler aynı direnci, stresi, straini ve katılığı göstermektedir [169, 170].

Anizotropik cisimlerde ise aynı kuvvet farklı eksenlerde uygulandığında her yüzeyi farklı tepki vermekte ve cismin mekanik özellikleri malzeme gövdesinin yönüne bağlı olmaktadır. Ayrıca atomların konsantrasyonları ve dağılımları farklı olduğu için eksen değiştikçe yapılan ölçümler de değişmektedir [169, 170].

Homojen Cisim

Bütün noktalarda aynı materyaller özellikleri gösteren ve elastik özellikleri farklı noktalarda değişmeyen cisimler homojen cisim olarak tanımlanmaktadır [156].

2.5.2 Sonlu elemanlar analiz yönteminin avantajları

Sonlu elemanlar analizi yönteminin avantajları aşağıda maddelenmiştir [164, 171]:

- Karmaşık geometriye ve düzensiz yapıya sahip cisimler güvenli ve kolay bir şekilde modellenerek analizi gerçekleştirilebilmektedir.
- Düğüm noktası fazla olan dış, dış kökü, delikli yapıya sahip cisimler gibi yapıların analizi gerçekleştirilebilmektedir.
- Yapıyı bütün olarak değil küçük parçalara ayrılarak çözümlenmesi ile neden sonuç ilişkisinde olan problemlerin daha basite indirgenerek anlaşılmasını ve çözüme ulaşılmasını sağlamaktadır.
- Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile analitik ve deneysel yöntemlerden daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.
- Non-invaziv bir yöntemdir.
- Tekrarlanabilir bir yöntemdir.
- Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile hem statik hem dinamik analizler yapılabilmektedir.
- Analizde kullanılacak materyallerin fiziksel özellikler simüle edilebilmektedir.
- Sınır koşulları belirlenebilmektedir.
- Sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılan çalışmalar ve bilgisayar yazılım sisteminin olması yöntemi çok yönlü ve güçlü matematiksel bir yöntem olmasını sağlamaktadır.
- Dış, alveolar mukoza, kemik, tedavi sırasında kullanılan materyaller gibi birçok yapı simüle edilerek analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

2.5.3 Sonlu elemanlar analiz yönteminin dezavantajları

Sonlu elemanlar analizi yönteminin dezavantajları aşağıda maddelenmiştir [164, 171]:

- Analizin gerçekleştirileceği yazılım programlarının maliyeti yüksektir.

- Kullanılan yazılım programlarının güncel teknolojiyi takip edebilmesi için düzenli olarak güncellemesi yapılmalıdır.
- Yapılan analizin ve sonuçların doğruluğu materyal özelliklerinin sisteme doğru şekilde yüklenmesine bağlıdır.
- Analiz bir model üzerinde gerçekleştirildiği için gerçeği tam olarak yansıtamamaktadır. Elde edilen tüm sonuçlar yaklaşık olarak kabul edildiği için gerçek sonuçları tam olarak tahmin edememektedir.
- Uygulayıcı modeli kısıtlama olmadan detaylandırabilmektedir. Bu yüzden subjektif olarak değerlendirilebilmektedir.

2.5.4 Sonlu elemanlar analiz yönteminin aşamaları

Sonlu elemanlar analizi yöntemi birbirini takip eden üç temel aşamadan (pre-processing, analiz, post processing) meydana gelmektedir. Bu bölümde bahsedilen analiz aşamalarının önemi ve katkısı açıklanacaktır.

Aşamalar:

- Hazırlık Aşaması (Pre-processing)
- Çözüm Aşaması (Analiz)
- İşlem Sonu Düzenleme Aşaması (Post-processing)

Problem ve uygulanacak analizin belirlenmesi: Problemin çözümü için uygun yöntemi tespit etmek ve güvenilir analiz sonuçları elde edebilmek amacıyla problemin doğru tanımlanması ilk aşamadır [156, 157].

Geometrik modelin oluşturulması: Analizin gerçekleştirileceği modelin gerçeğe yakın olması, analiz sonuçlarının doğruluğu için önemli aşamalardan biridir [156, 157]. Gerçeğe yakın bir geometrik model oluşturabilmek amacıyla incelenecek yapının geometrisinin bilgilerinin sisteme girilmesi gerekmektedir. MR (manyetik rezonans görüntüleme), BT (bilgiyaralı tomografi) biyolojik dokuların modellenmesinde en sık kullanılan yöntem olmakla birlikte, modellenmesi istenen cismin yüzey tarayıcıları ile taranması veya üç boyutlu modelleme programları kullanılarak cismin uygulayıcı tarafından çizilerek oluşturulduğu manuel modelleme yöntemleri de kullanılabilir [172, 173].

Matematiksel Modelin oluşturulması: Analiz edilecek yapı, boyut ve geometrisine uygun elemanlara bölünerek bir ağ yapısı oluşturulmaktadır. Oluşturulan ağ yapı matematiksel model olarak isimlendirilmektedir [171].

Yapının çeşitli programlar aracılığıyla bilgisayara aktarılmasıyla oluşan geometrik modeller, manuel olarak dijitalize edilerek veya programlar tarafından otomatik olarak ağ yapısına dönüştürülmektedir. Manuel modelleme, uygulayıcının çalışma süresini arttırsa da ağ yapının daha kontrollü oluşturulmasını sağlamaktadır [173].

Ağ yapıda kullanılacak olan farklı sayı ve tipte elemanlar problemin boyutuna ve özelliklerine göre belirlenmektedir. Sonuçların hassas olarak ölçülebilmesi için mümkün olan en fazla sayıda eleman kullanılması önerilmektedir. Analiz sonuçlarının gerçeğe yakın bir şekilde elde edilebilmesi için yapıyı oluşturan elemanların modele uygun büyüklük, geometri ve sıralamada olması gerekmektedir [156].

Malzeme özelliklerinin sisteme aktarılması: Biyolojik yapıya ait farklı materyal özellikleri belirlenerek sisteme tanımlanmakta ve geometrik modele yansıtılmaktadır. Sisteme; yapının geometrisini oluşturacak koordinatlar, uygun eleman türleri, materyallerin Young's modülü ve Poisson oranı, uygulanacak kuvvet, sınır ve yükleme koşulları ve uygulanacak analizin tipi aktarılmaktadır [174].

Sınır koşullarının belirlenmesi: Yapının sabitleme bölgelerini ve kuvvet uygulama bölgelerini belirleyen sınır koşulları, streslerin ve yer değiştirme hareketlerinin sınırlarını belirtmektedir. Analizin gerçekleştirileceği yapının kuvvet uygulama alanlarına göre sınır koşulları oluşturulmaktadır [171]. Sınır koşullarının belirlenmesi ile model analiz aşamasına geçilmeye uygun hale gelmektedir [156].

Çözüm Aşaması (Analiz)

Hazırlanan matematiksel modelde bulunan eleman tipleri ve yükleme koşulları sisteme tanımlanmalıdır. Planlanan kuvvetin büyüklüğü, yönü ve açısı belirlenerek yükleme koşulları oluşturulmaktadır. Modelde belirlenen düğüm noktalarından kuvvet uygulanmakta ve ağ yapıdaki diğer düğüm noktalarındaki yer değişimleri ve stresler hesaplanmaktadır [156, 157]. Parçadan bütüne giden sistemde, elemanların kuvvet altında gösterdikleri tepkiler ana yapıyı taklit etmektedir [171].

Sistem içerisindeki her eleman için ayrı denklem oluşturularak analiz gerçekleştirilmekte ve düğüm noktalarındaki değerlere ulaşılmaktadır. Analizlerin

gerçekleştirilmesinin ardından elde edilen veriler grafik ve tabloların oluşturulmasında kullanılarak yorumlanmaktadır [155, 157, 175].

Sonuçların Değerlendirilmesi Aşaması (Post-Processing)

Yükleme koşullarının ardından elde edilen veriler değerlendirilirken, analizin gerçekleştirileceği materyalin mekanik özellikleri dikkate alınarak uygulanacak analiz yöntemi belirlenmektedir. Kemik gibi kırılğan maddeler için asal gerilim değerleri, titanyum gibi sünebilir materyaller için ise Von Misses stres değerleri tercih edilebilmektedir. Von Mises stres değerleri ile bütün yapıda oluşan makaslama kuvvetlerinin bileşke değeri ile ilgili bilgi edinilirken, maksimum principal stress çekme tipi gerilim, minimum principal stress ise sıkışma tipi gerilim değerleri hakkında bilgi vermektedir. Ek olarak, Von Misses stres değerleri plastik deformasyona neden olan distorsiyon enerjisi ile alakalı olduğu için yield noktasını tanımlamakta kullanılmaktadır [171].

Analizler sonucu elde edilen sayısal değerler grafik, tablo, animasyon, cismin hareketlerinin görselleri şeklinde şematize edilebilirken gerilme değerlerini ifade eden renklendirilmiş görsel veya animasyonlar da kullanılabilir. Tüm modele ait uzayın üç yönünde oluşan gerilme ve yer değiştirme verilerinin renk skalası şeklinde bir ölçek ile görselleştirilmesi analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır [173].

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışma, Bezmialem Vakıf Üniversitesi Girişimsel Olmayan Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır (Karar no: 2024/67, Karar tarihi: 14.02.2024) (Ek A). Tinus Technologies iş birliği ile yürütülen bu çalışma, 20240206 numaralı proje kapsamında Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Bu çalışmada Bezmialem Vakıf Üniversitesi hasta arşivinde 01.02.2019-02.03.2023 tarihleri arasında tedavi görmüş dental ekspansiyon ihtiyacı olan ve önce cerrahi planlanan 20 yaşında erkek hastanın ortodontik tedavi öncesinde alınan Bilgisayarlı Tomografi (BT) verisi dahil edilme kriterlerine göre seçilmiş ve hastadan onay verdiğine dair aydınlatılmış onam formu alınmıştır.

3.1 Dahil Edilme Kriterleri

- Daimi dentisyonun tamamlanmış olması
- Dental ekspansiyon ihtiyacı olması (≤ 4 mm)
- Eksik diş bulunmaması
- Fenestrasyon ve dehissens ve kemik defektlerinin bulunmaması
- Periodontal hasarının olmaması
- Parafonksiyonel alışkanlığının olmaması
- Ortodontik tedavi hikayesinin olmaması
- Molar ve premolar dişler arasında çapraşıklık, diastema olmaması diş kontaktlarının sıkı olması
- Kemik metabolizmasını etkileyecek ilaç kullanımı ve/veya sistemik bir hastalığının olmaması

3.2 Dışlanma Kriterleri

- İskeletsel ekspansiyon ihtiyacı olması
- Dudak damak yarığına sahip olması

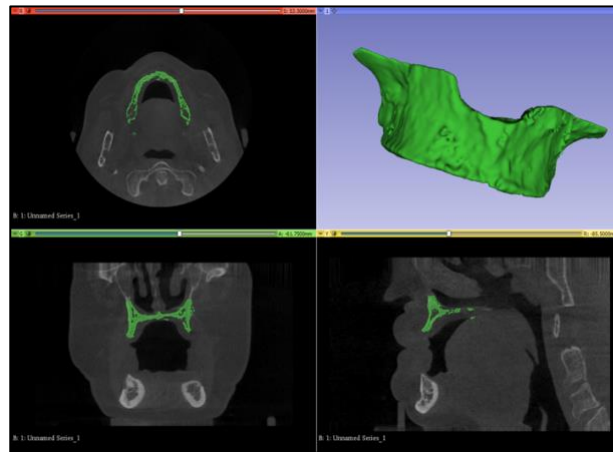
- Kemik metabolizmasını etkileyecek ilaç kullanımı ve/veya sistemik hastalığın olması
- Daha önce ortodontik tedavi gören hastalar
- Baş boyun bölgesini etkileyen sendromu olan veya radyoterapi görmüş hastalar

3.3 Geometrik Modellerin Oluşturulması

Üç boyutlu ağ yapısının düzenlenmesi ve matematiksel olarak uygun katı ağ yapısına dönüştürülmesi, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi modellerinin oluşturulması ve sonlu elemanlar stres analizi işlemi için kullanılan bilgisayarın özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- 2.50 GHz saat hızında 11th Gen Intel (R) Core (TM) i9-12900 işlemci
- 64 GB ECC bellek

Hastanın ortodontik tedavi öncesinde alınan BT verisinden maksilla kemik modelinin elde edilmesi 3D Slicer yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tomografi verisinden .stl modelin elde edilmesi için de 3D Slicer yazılımı kullanılmıştır. Tersine mühendislik ve üç boyutlu CAD faaliyetleri Blender yazılımı, katı modellerin analiz ortamına uygun hale getirilmesi ve optimize ağ örgüsünün oluşturulması faaliyetleri ALTAIR Hypermesh yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin çözümü ALTAIR Optistruct (ALTAIR, Troy, MI, USA) çözücüsünde gerçekleştirilmiştir.

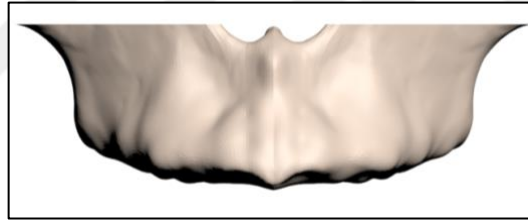


Şekil 3.1: Hastaya ait DICOM verilerinin görünümü.

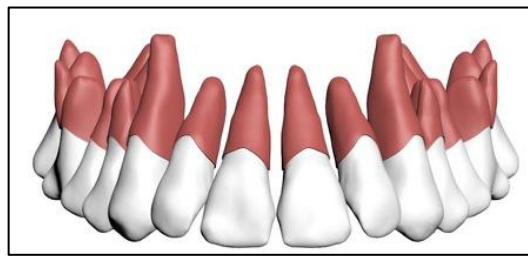
3.3.1 Kortikal kemik, trabeküler kemik ve mukozanın modellenmesi

Çalışmada kullanılan maksilla kemik modelinin oluşturulması amacıyla 20 yaşında erişkin bir hastaya ait bilgisayarlı tomografi verisi 0.3 mm kesit kalınlığı ile rekonstrükte edilmiştir. Rekonstrüksiyon sonucunda elde edilen tomografi verileri, DICOM (.dcm) formatında 3DSlicer yazılımına aktarılmıştır. DICOM formatındaki BT verisi, 3DSlicer yazılımında uygun Hounsfield değerlerine göre ayrıştırılmıştır (Threshold Aralığı: 426,50 – 3193,04). İstenmeyen bölgeler ve artefaktlar, 'Erase' ve 'Scissors' parametreleri kullanılarak temizlenmiştir. Uygun segmentlere ayrılan veriler, segmentasyon işlemi ile üç boyutlu modellere dönüştürülmüş ve modellerin .stl formatında dışa aktarımı gerçekleştirilmiştir.

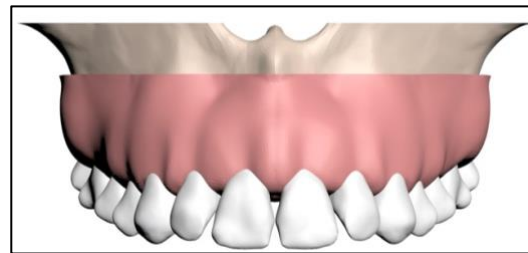
Üç boyutlu maksilla kortikal kemiğinin iç yüzeyi referans alınarak trabeküler kemik modellenmiştir. Kortikal kemik modeline dış yüzeye doğru offset verilerek mukoza modellenmiştir. PDL ise dişlerin dış yüzeyi referans alınıp 0.25 mm offset verilerek elde edilmiştir. Tüm modeller Blender yazılımında üç boyutlu olarak uzayda doğru koordinatlara konumlandırılarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2: Üst çene kemik modeli.



Şekil 3.3: Üst çene dişlerinin ve periodontal ligamentlerin modeli.



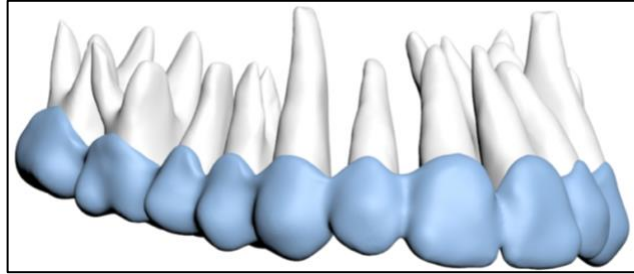
Şekil 3.4: Üst çene kemik, diş, periodontal ligament ve mukoza modeli.

3.3.2 Şeffaf plak ve ataşmanların modellenmesi ve çalışma modellerinin oluşturulması

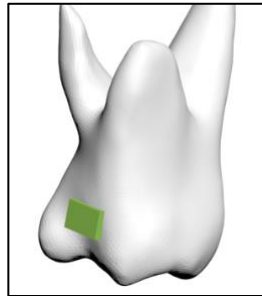
Çalışmada kullanılan şeffaf plak ve ataşmanların modellenmesi Blender yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki referans çalışmaya göre, şeffaf plaklar tüm çalışma modelleri için 0.6 mm kalınlığında modellenmiştir [127]. Ataşmanlar; horizontal dikdörtgen ataşman, gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman, okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman ve optimize ekspansiyon destek ataşmanı olmak üzere dört farklı geometride hazırlanmıştır.

Literatürde önerilen ataşman boyutlarına uygun olarak horizontal dikdörtgen ataşmanların genişliği 3 mm, yüksekliği 2 mm, kalınlığı 1 mm olarak modellenmiştir. Gingival ve okluzal eğimli olan horizontal dikdörtgen ataşmanlar ise ince kenarı 0.25 mm, kalın kenarı 1.25 mm olacak şekilde modellenmiştir [176].

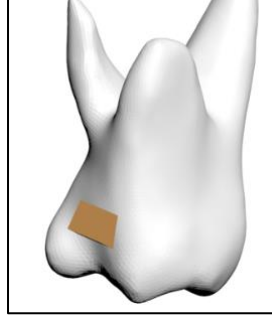
Optimize ekspansiyon destek ataşmanına ait boyut bilgilerinin literatürde bulunmaması nedeniyle, tedavi planında optimize ekspansiyon destek ataşmanı yer alan bir hastanın ataşman yerleştirme seansı sonunda 3D intraoral tarama görüntüleri elde edilmiştir. iTero 5D Element Scanner (Align Technology, Santa Clara, Calif) ile gerçekleştirilen 3D intraoral tarama sonrasında elde edilen dijital veri aracılığıyla, optimize ekspansiyon destek ataşmanının üç boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir.



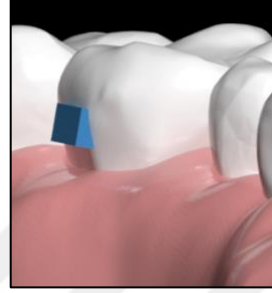
Şekil 3.5: Şeffaf plak modeli.



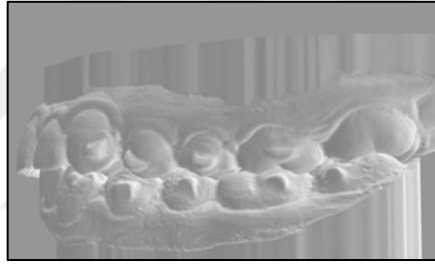
Şekil 3.6: Horizontal dikdörtgen ataşman modeli.



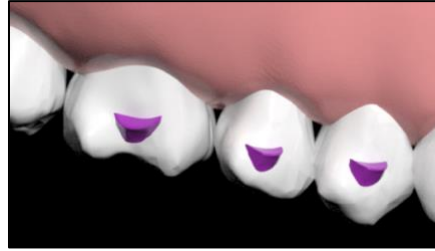
Şekil 3.7: Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman modeli.



Şekil 3.8: Okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman modeli.



Şekil 3.9: 24, 25 ve 26 numaralı dişlerinde optimize ekspansiyon destek ataşmanı bulunan hastanın 3D intraoral tarama görüntüsü.



Şekil 3.10: Molar ve premolar dişlere uygulanan optimize ekspansiyon destek ataşmanı modeli

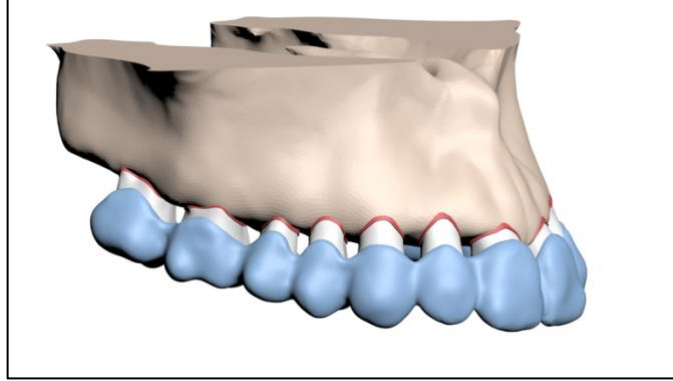
Farklı ataşman tasarımı ve farklı diş yüzeylerini içeren altı çalışma grubu ile birlikte ataşman bulunmayan kontrol grubu olmak üzere yedi farklı çalışma modeli oluşturulmuştur.

Tablo 3.1: Çalışma modelleri

	1.Molar Bukkal	1.Molar Palatinal	2. Premolar	1. Premolar
Kontrol Grubu	X	X	X	X
Grup 1	Horizontal dikdörtgen ataşman	X	Horizontal dikdörtgen ataşman	Horizontal dikdörtgen ataşman
Grup 2	Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman	X	Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman	Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman
Grup 3	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	X	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı
Grup 4	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	Okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı
Grup 5	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	Horizontal dikdörtgen ataşman	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı	Optimize ekspansiyon destek ataşmanı
Grup 6	X	Horizontal dikdörtgen ataşman	X	X

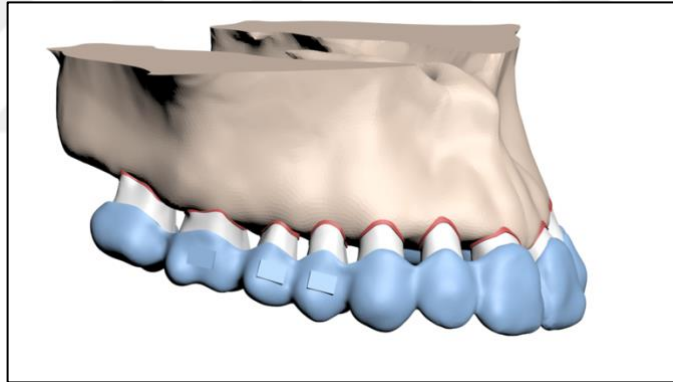
Grupların Oluşturulması

Kontrol grubu: Diş yzeylerine herhangi bir ataşman yerleştirilmeden sadece şeffaf plaklar kullanılmıştır.



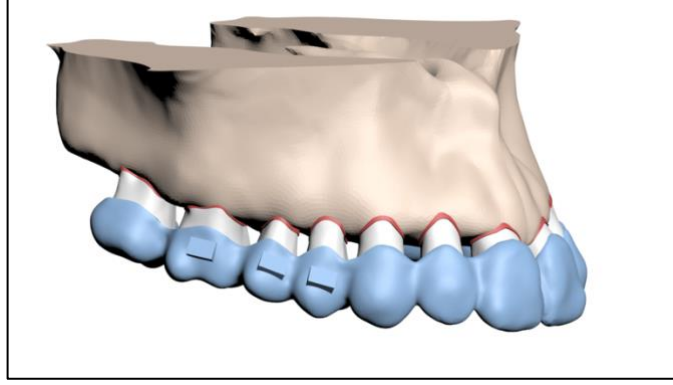
şekil 3.11: Kontrol grubuna ait model.

Grup 1: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yzeyinin orta uęlősüne horizontal dikdörtgen ataşman (3mm x 2mm x 1mm) yerleştirilmiştir. Palatinal yzeyde ataşman yoktur.



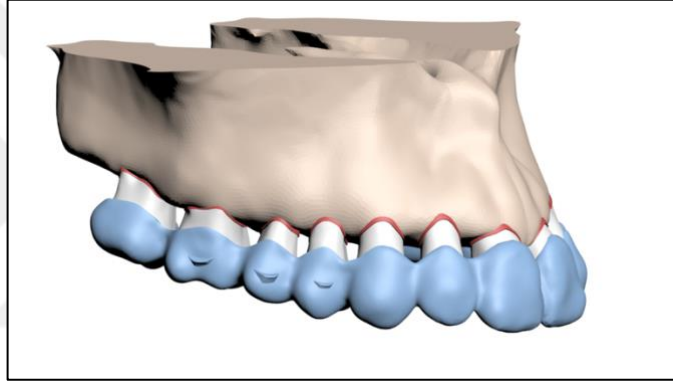
şekil 3.12: Grup 1'e ait model.

Grup 2: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yzeyinin orta uęlősüne 3 mm genişliğinde gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir. Palatinal yzeyde ataşman yoktur.



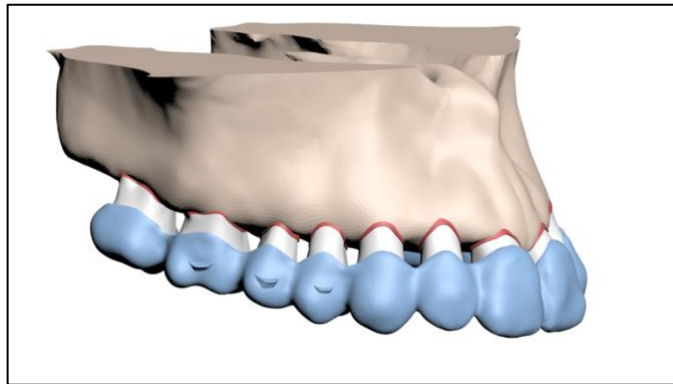
Şekil 3.13: Grup 2'ye ait model.

Grup 3: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yüzeyinin orta üçlüsüne optimize ekspansiyon destek ataşmanı yerleştirilmiştir. Palatinal yüzeyde ataşman yoktur.

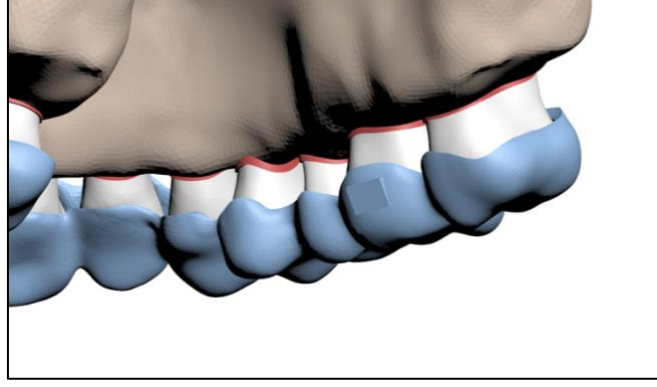


Şekil 3.14: Grup 3'e ait model.

Grup 4: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yüzeyinin orta üçlüsüne optimize ekspansiyon destek ataşmanı yerleştirilmiştir. Ek olarak, palatinal yüzeyin orta üçlüsüne okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir.

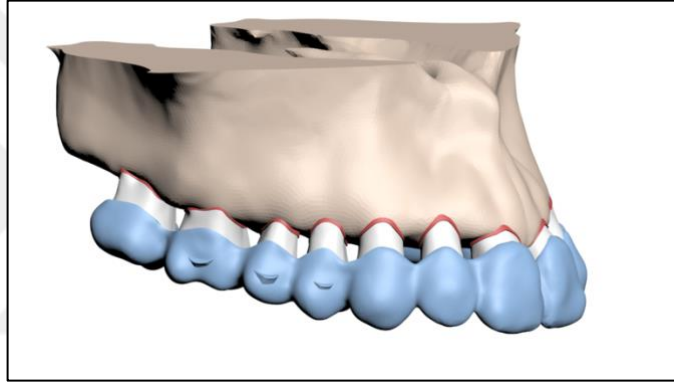


Şekil 3.15: Grup 4'e ait model.

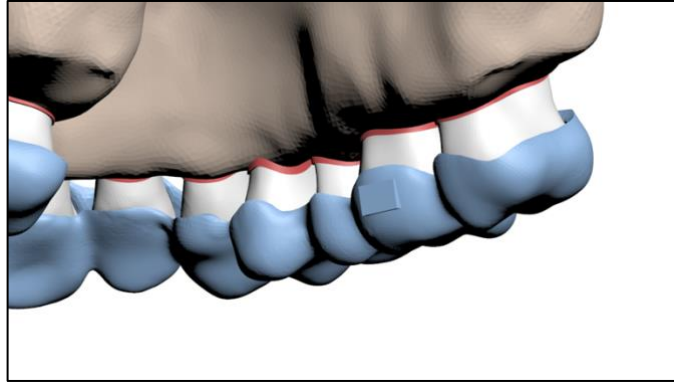


Şekil 3.16: Grup 4'e ait modelin palatinal görüntüsü.

Grup 5: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yüzeyinin orta üçlüsüne optimize ekspansiyon destek ataşmanı yerleştirilmiştir. Ek olarak palatinal yüzeyin orta üçlüsüne horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir.

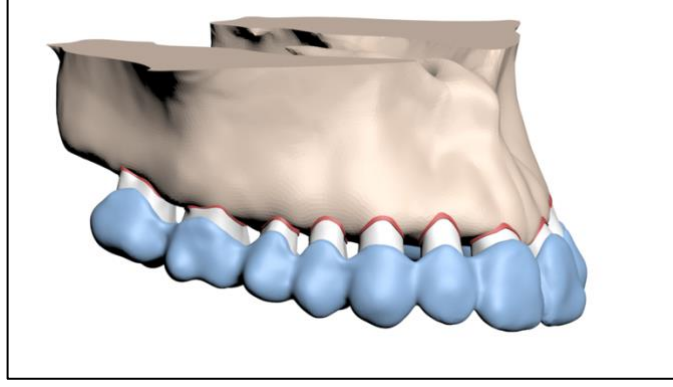


Şekil 3.17: Grup 5'e ait model.

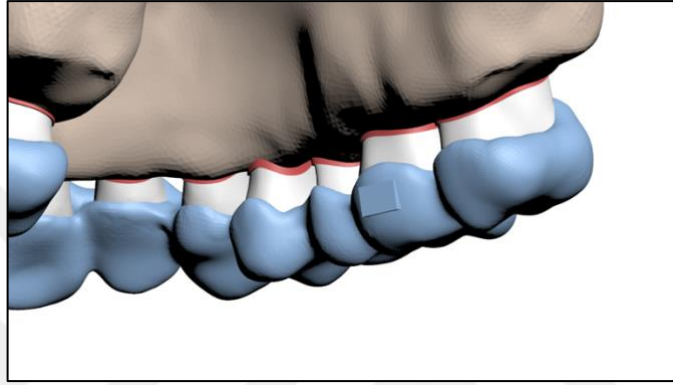


Şekil 3.18: Grup 5'e ait modelin palatinal görüntüsü.

Grup 6: Birinci molar, birinci premolar ve ikinci premolar dişin bukkal yüzeyine ataşman yerleştirilmemiştir. Sadece birinci molar dişin palatinal yüzeyinin orta üçlüsüne horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir.



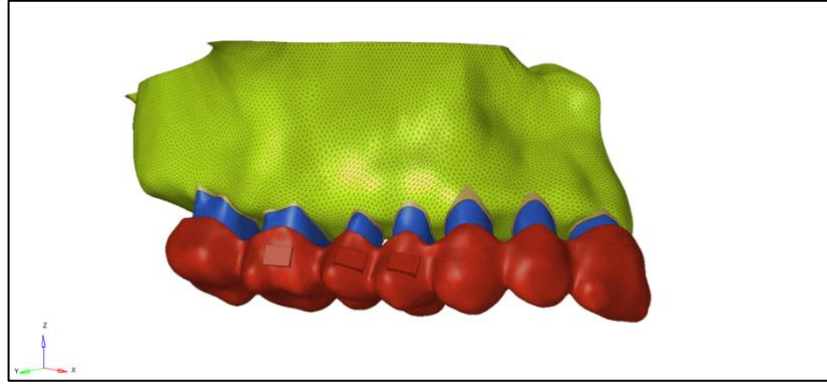
Şekil 3.19: Grup 6'ya ait model.



Şekil 3.20: Grup 6'ya ait modelin palatinal görüntüsü.

3.4 Matematiksel Modellerin Oluşturulması

Matematiksel modeller, geometrik modellerin mesh adı verilen daha basit ve küçük parçalara bölünmesiyle oluşturulmaktadır. Blender yazılımında modelleme işlemi tamamlandıktan sonra, modeller ALTAIR Hypermesh yazılımıyla matematiksel olarak oluşturulup analize hazır hale getirilmiştir. Çalışmada matematiksel modeller oluşturulurken 0.1-0.25 mm aralığında tria mesh boyutları kullanılmıştır. Tüm modellerin yüzey meshleri tria adı verilen üçgen meshler ile meshlendikten sonra, objelerin katı meshleri tetrahedral tipte katı mesh ile oluşturulmuştur. Analizlerin yapılabilmesi için, ALTAIR Hypermesh yazılımında hazırlanan matematiksel modeller ALTAIR Optistruct çözücüsüne aktarılmıştır.



Şekil 3.21: Analizin gerçekleştirileceği matematiksel model.

3.5 Kullanılan Materyal Özellikleri

Analizlerde Young's modülü ve poisson oranı belirtilen malzemelerin lineer malzeme özellikleri kullanılmıştır. Analiz gerçekleştirilen modelin malzeme özellikleri sayısal olarak Tablo 3.2'de tanımlanmıştır.

Tablo 3.2: Analizde kullanılan malzemelerin Young's modülü ve poisson oranı değerleri.

Malzeme	Young's modulus [MPa]	Poisson Oranı
Diş	1.96×10^4	0,3
Periodontal ligament	0,69	0,45
Kompozit Ataçman	12.5×10^3	0,36
Şeffaf plak	528	0,36
Kortikal kemik	1.37×10^3	0,3
Spongios kemik	1370	0,3

3.6 Kuantitatif Model Bilgileri

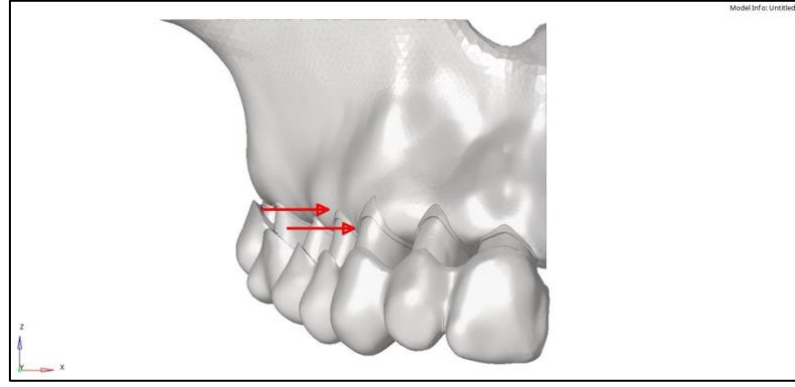
Oluşturulan yedi analiz modeli için düğüm ve element sayıları bilgileri Tablo 3.3'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3: Analizde kullanılan modellerin kuantitatif model bilgileri.

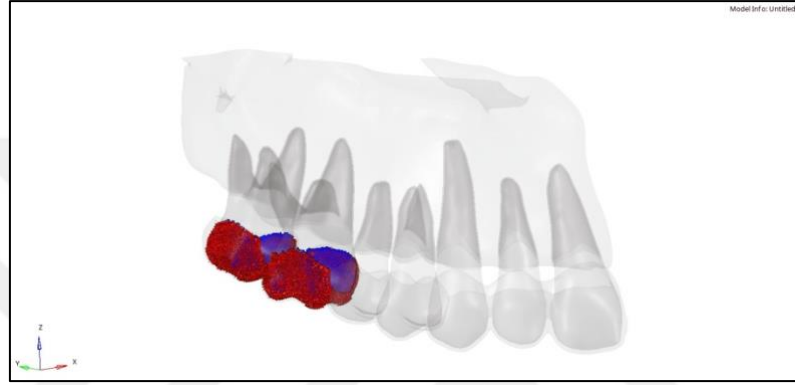
	Total # of Nodes	Total # of Elements
Model 1	629179	2248857
Model 2	557453	1956349
Model 3	557108	1957533
Model 4	698135	2592528
Model 5	572910	2040685
Model 6	651376	2354483
Model 7	575772	2048432

3.7 Yükleme Senaryoları ve Sınır Koşulları

Klinik koşulları daha gerçekçi biçimde temsil edebilmek amacıyla, literatürde tanımlanan “ters yönlü yükleme yöntemi” temel alınmıştır. Referans çalışmada, şeffaf plak deformasyonu sonucu oluşan kuvvetler, ilgili dişe ters yönde uygulanarak kuvvet aktarımı simüle edilmiştir [177]. Benzer bir yaklaşımla, bu çalışmada maksiller ekspansiyon simülasyonu için ters yönlü yükleme yöntemi kullanılmıştır. Modelleme sürecinde, ekspansiyon hedefi doğrultusunda ilgili birinci ve ikinci molar dişler 0.2 mm palatinal yönde hareket ettirilmiş, bu hareket sonucu şeffaf plak geometrisinde oluşan deformasyon, çözümleyici ortamda hesaplanmıştır. Elde edilen deformasyona bağlı temas kuvvetleri, simülasyon ortamında ilgili diş yüzeylerine ters yönde uygulanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde şeffaf plak kaynaklı kuvvet iletiminin daha fizyolojik bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır. Bu yükleme yaklaşımıyla, şeffaf plakların biyomekanik etkilerini doğru şekilde yansıtmak ve klinik ortamla uyumlu sonuçların elde edilmesini sağlamak hedeflenmiştir.



Şekil 3.22: Ekspansiyonun tersi yönde uygulanan diş hareketi.



Şekil 3.23: Hesaplanan reaksiyon kuvvetlerinin uygulandığı diş ve şeffaf plak temas arayüzü.

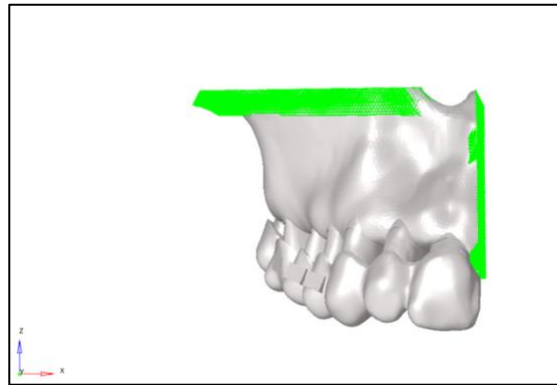
Ek olarak literatürde, özellikle molar ve premolar bölgelerde moment dengesi sağlanabilmesi için tork telafisine ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Referans çalışmaya göre, 0.2 mm plak aktivasyonunda, birinci molarda 1.6° 'lik, birinci premolarda 2.35° 'lik, ikinci premolarda ise 2.15° 'lik tork telafisi eklenmiştir [178].

Bu çalışmada, maksiller molar dişlerde ekspansiyonun simüle edildiği yedi farklı senaryoda uygulanan kuvvetler sonucu; posterior dişlerde ve periodontal ligamentteki stres dağılımı, şeffaf plak deformasyonu ile X, Y, Z ekseninde ve total yer değiştirme miktarları sonlu elemanlar analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Dişlerin hareket miktarlarının değerlendirildiği referans noktalar Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Dişlerin hareket miktarlarının değerlendirildiği referans noktaları.

Birinci Premolar	İkinci Premolar	Birinci Molar	İkinci Molar
Bukkal tüberkül tepesi	Bukkal tüberkül tepesi	Meziobukkal tüberkül tepesi	Meziobukkal tüberkül tepesi
Palatinal tüberkül tepesi	Palatinal tüberkül tepesi	Distobukkal tüberkül tepesi	Distobukkal tüberkül tepesi
Bukkal kök apeksi	Kök apeksi	Meziopalatinal tüberkül tepesi	Meziopalatinal tüberkül tepesi
Palatinal kök apeksi		Distopalatinal tüberkül tepesi	Distopalatinal tüberkül tepesi
		Meziobukkal kök apeksi	Meziobukkal kök apeksi
		Distobukkal kök apeksi	Distobukkal kök apeksi
		Palatinal kök apeksi	Palatinal kök apeksi

Maksilla superior bölgesinde yer alan düğüm noktaları her üç ekseninde tüm serbestlik dereceleri kısıtlanarak model sabitlenmiştir. Modeldeki tüm bileşenlere X eksenine normalinde ve Y-Z düzlemine göre simetrik olacak şekilde sınır koşulu uygulanmıştır. Belirtilen kuvvet ve sınır koşulları altında toplam yedi nonlineer statik analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24: Sınır koşulları.

3.8 Sistemlerin Birleştirilmesi ve Parçalar Arası Bağlantı Durumu

Oluşturulan matematiksel modellerde analizlerin doğru şekilde uygulanarak sonuçlandırılması amacıyla, modeli oluşturan parçaların birbirleriyle olan yüzey ilişkilerinin analiz programında tanımlanması gerekmektedir.

şeffaf plak - ataşman ve şeffaf plak - diş ara yüzlerinde $\mu=0.2$ katsayılı sürtünme kontağı tanımlanmıştır. Diş-pdl-kemik temas bölgeleri FREEZE tipi kontak tanımı gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım parçaların hareketi esnasında tam korelasyon ile hareket ettiği varsayımına dayanmaktadır.



4. BULGULAR

Bu çalışmada, farklı ataşman tasarımları kullanılarak şeffaf plaklar ile üst molar dişlerde gerçekleştirilen ekspansiyon tedavilerinde, uygulanan kuvvetlerin etkisiyle ankraj ünitesi olarak görev yapan dişler ve çevre dokularda meydana gelen gerilmeler ile X, Y, Z eksenlerinde ve toplamda oluşan yer değiştirme miktarları, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi, kuvvetin uygulandığı ilk anda ortaya çıkan sonuçları belirtmektedir.

Analizin sonuçlarında, dişler, şeffaf plak materyali ve çevre dokular üzerinde tanımlanan düğüm noktalarında oluşan Von Mises gerilme değerleri, maksimum principal stres değerleri ve yer değiştirme miktarları renk haritaları aracılığıyla görselleştirilmiş ve yer değiştirme miktarları ayrıca sayısallaştırılmıştır. Renk skalasında kırmızı alanlar maksimum gerilme veya yer değiştirme bölgelerini, mavi alanlar ise minimum değerlerin gözlendiği bölgeleri temsil etmektedir. Gerilme değerleri “N/mm²”, yer değiştirme değerleri ise “mm” cinsinden ifade edilmektedir.

4.1 Grupların X-Y-Z Ekseninde ve Total Yer Değiştirme Miktarları

4.1.1 Kontrol grubu

Diş yüzeylerinde ataşman bulunmayan kontrol grubunda, maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te belirlenen referans noktadaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.1’de “mm” cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.1: Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.058	-0.023	0.02	0.066
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.063	0.002	-0.009	0.064

Tablo 4.1 (devamı): Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.

1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.022	-0.003	0.007	0.023
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.015	0.006	-0.007	0.018
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.077	-0.04	0.041	0.096
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.093	-0.014	-0.002	0.095
2. Premolar Kök Apeksi	0.027	0.011	-0.003	0.03
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.104	-0.034	0.036	0.115
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.110	-0.039	0.048	0.126
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.117	-0.017	-0.011	0.119
1. Molar Distopalatinal Tüberkül tepesi	-0.119	-0.019	-0.006	0.121
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.016	-0.007	0.02	0.027
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.012	-0.01	0.039	0.042
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.017	0.013	-0.047	0.052
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.114	-0.047	0.056	0.136
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.122	-0.047	0.054	0.141

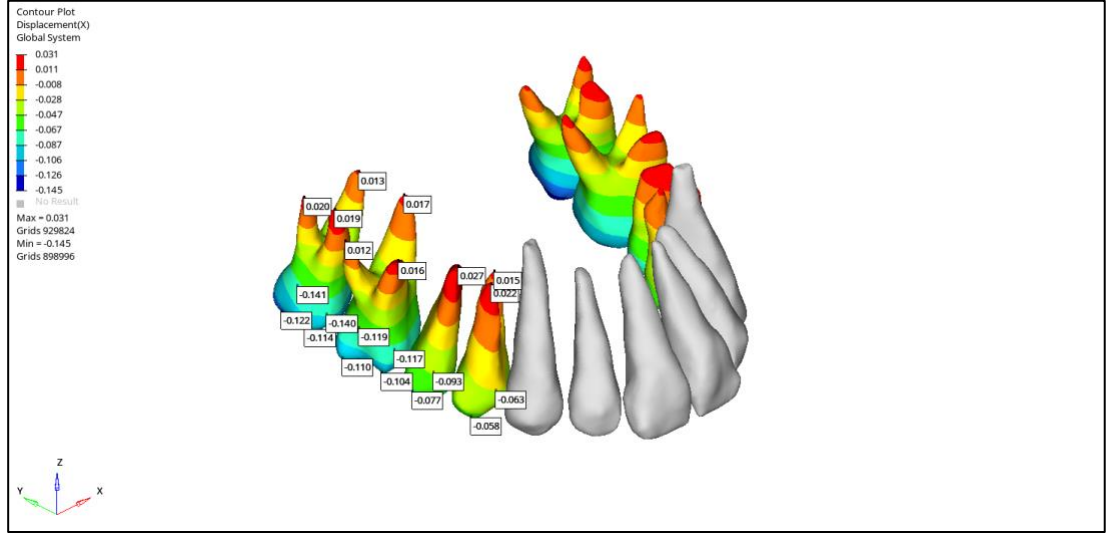
Tablo 4.1 (devamı): Kontrol grubuna ait diş hareketi değerleri.

2. Molar				
Meziopalatinal	-0.140	-0.020	-0.005	0.0142
Tüberkül Tepesi				
2. Molar Distobukkal				
Tüberkül Tepesi	-0.141	-0.019	-0.009	0.143
2. Molar Meziobukkal				
Kök Apeksi	0.019	-0.001	0.007	0.02
2. Molar Distobukkal				
Kök Apeksi	0.020	-0.007	0.025	0.033
2. Molar Palatinal Kök				
Apeksi	0.013	0.026	-0.062	0.068

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 1.117 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.017 mm palatinal hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.104 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.016 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.140 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.013 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.011 mm ile birinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Kontrol Grubunda X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

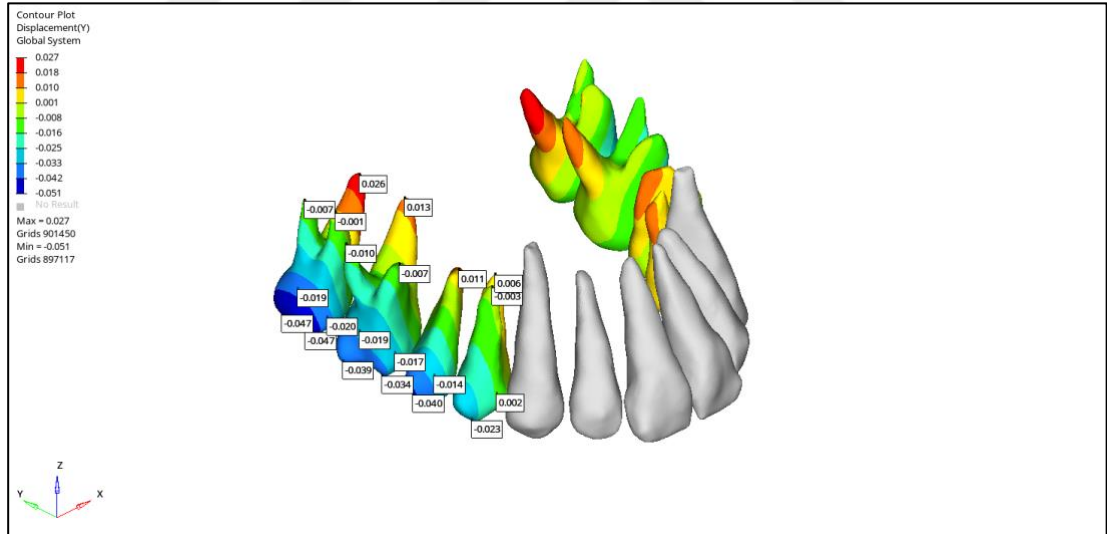
Çalışmamızın kontrol grubunda, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1: Kontrol grubunda X eksenindeki yer değiştirme miktarları.

Kontrol Grubunda Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

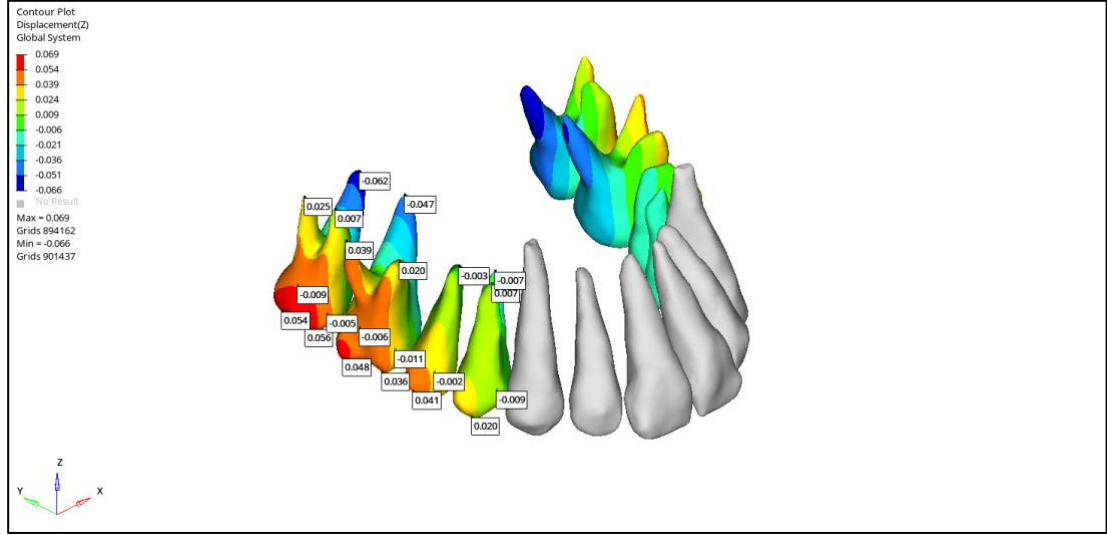
Çalışmamızın kontrol grubunda, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2: Kontrol grubunda Y eksenindeki yer değiştirme miktarları.

Kontrol Grubunda Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

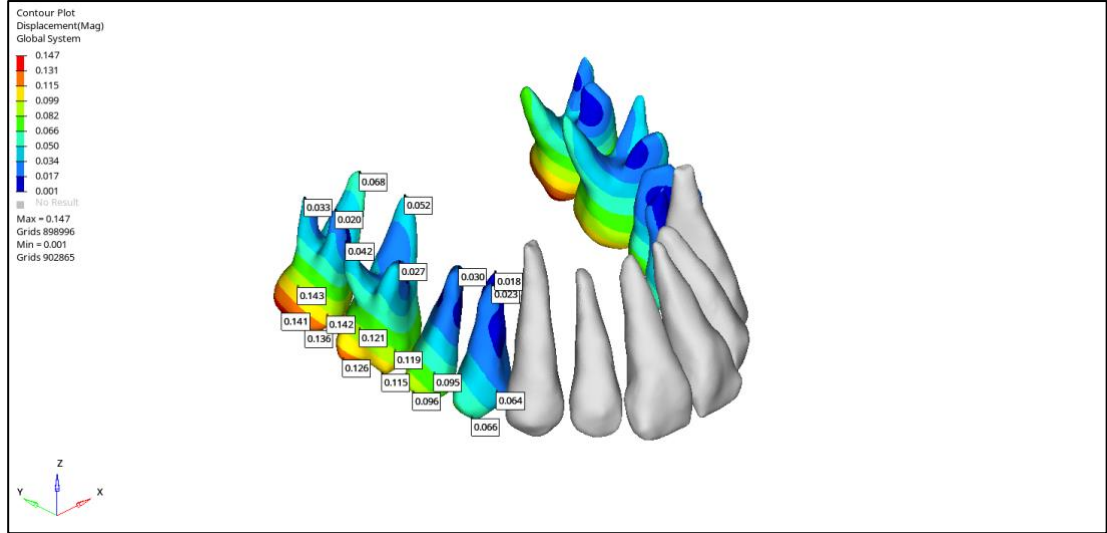
Çalışmamızın kontrol grubunda, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.3’te verilmektedir.



Şekil 4.3: Kontrol grubunda Z eksenindeki yer değiştirme miktarları.

Kontrol Grubunda Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

Çalışmamızın kontrol grubunda, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.4’te verilmektedir.



Şekil 4.4: Kontrol grubunda total yer değiştirme miktarları.

4.1.2 Grup 1

Bukkal yüzeyde horizontal dikdörtgen ataşman bulunan birinci grupta, maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de belirlenen referans noktalardaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.2’de “mm” cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.2: Birinci gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.065	-0.026	0.022	0.073
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.071	0.002	-0.10	0.071
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.024	-0.003	0.008	0.026
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.017	0.007	-0.008	0.02
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.086	-0.045	0.046	0.107
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.104	-0.016	-0.003	0.105
2. Premolar Kök Apeksi	0.031	0.013	-0.004	0.033
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.116	-0.038	0.040	0.128
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.123	-0.044	0.053	0.141
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.13	-0.019	-0.012	0.132
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.132	-0.022	-0.006	0.134
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.018	-0.008	0.022	0.029
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.013	-0.011	0.043	0.046

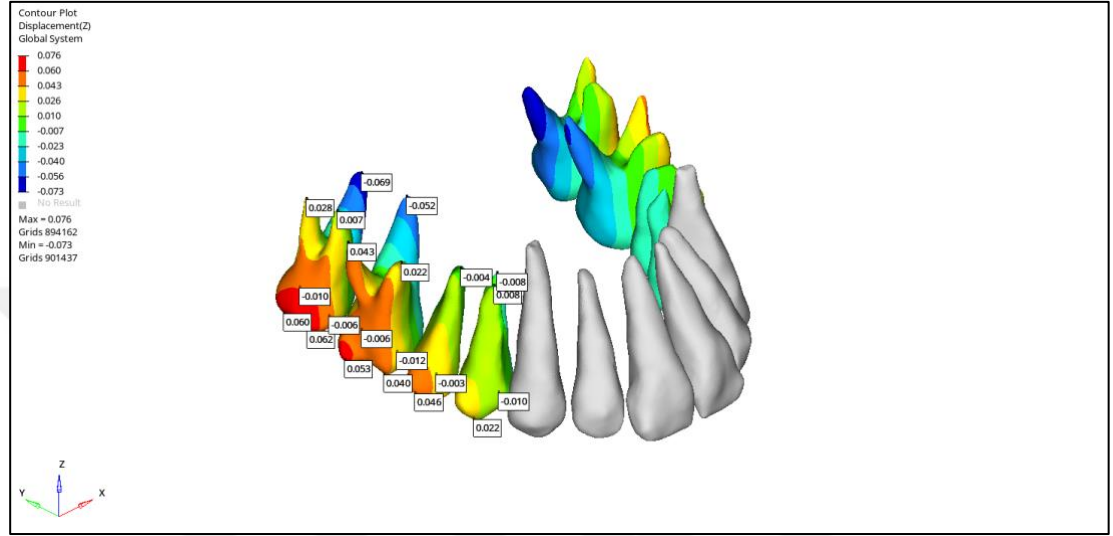
Tablo 4.2 (devamı): Birinci gruba ait diş hareketi değerleri.

1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.019	0.015	-0.052	0.057
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.127	-0.052	0.062	0.151
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.136	-0.052	0.060	0.157
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.156	-0.023	-0.006	0.158
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.157	-0.021	-0.010	0.159
2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.02	-0.001	0.007	0.022
2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.022	-0.008	0.028	0.036
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.014	0.029	-0.069	0.076

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.130 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.019 mm palatinal hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.116 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.018 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.156 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.014 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.012 mm ile birinci molar dişin

Grup 1’de Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değişirme Değerleri:

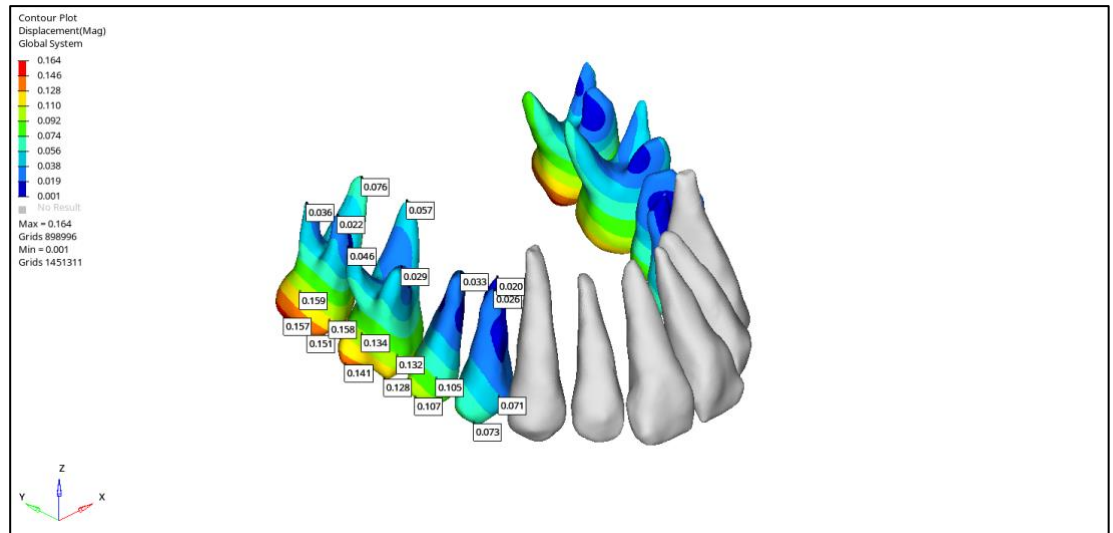
Birinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7: Birinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 1’de Meydana Gelen Total Yer Değişirme Değerleri:

Birinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8: Birinci grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.3 Grup 2

Bukkal yüzeyde gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman bulunan ikinci grupta ,maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de belirlenen referans noktalarındaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.3’te “mm” cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.3: İkinci gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.067	-0.027	0.023	0.075
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.072	0.02	-0.1	0.073
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.025	-0.003	0.008	0.026
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.018	0.007	-0.008	0.021
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.088	-0.046	0.047	0.11
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.107	-0.016	-0.003	0.108
2. Premolar Kök Apeksi	0.031	0.013	-0.004	0.034
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.119	-0.039	0.041	0.131
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.126	-0.045	0.054	0.144
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.133	-0.2	-0.012	0.135

Tablo 4.3 (devamı): İkinci gruba ait diş hareketi değerleri.

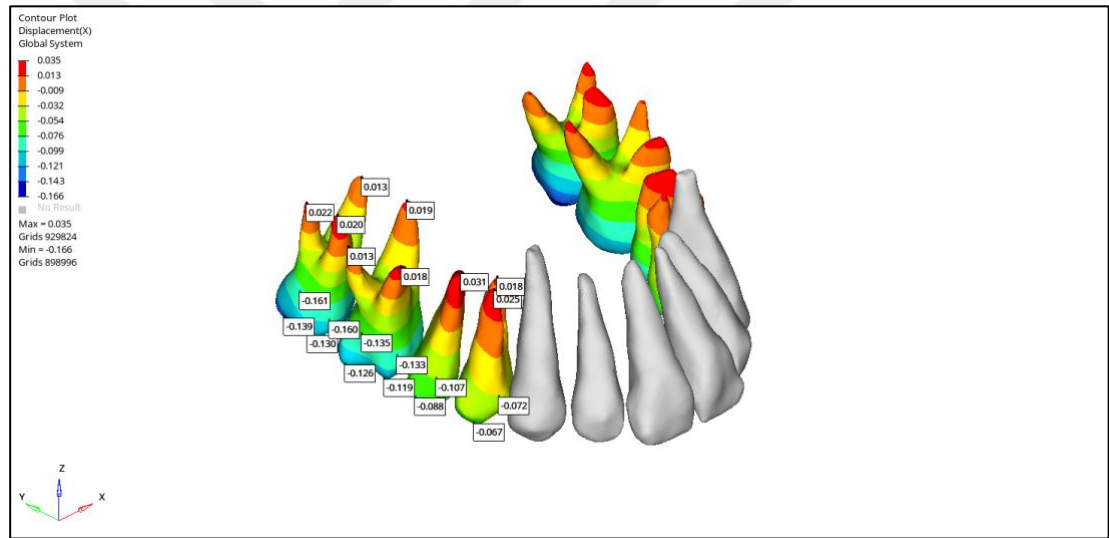
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.135	-0.022	-0.006	0.137
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.018	-0.008	0.022	0.03
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.013	-0.011	0.044	0.047
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.019	0.015	-0.053	0.058
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.130	-0.053	0.063	0.154
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.139	-0.053	0.061	0.161
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.160	-0.023	-0.006	0.161
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.161	-0.021	-0.01	0.163
2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.02	-0.001	0.007	0.021
2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.022	-0.008	0.028	0.037
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.013	0.029	-0.07	0.077

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.133 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.019 mm palatinal hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.119 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.018 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.160 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.013 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal

tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.012 mm ile birinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Grup 2’de X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

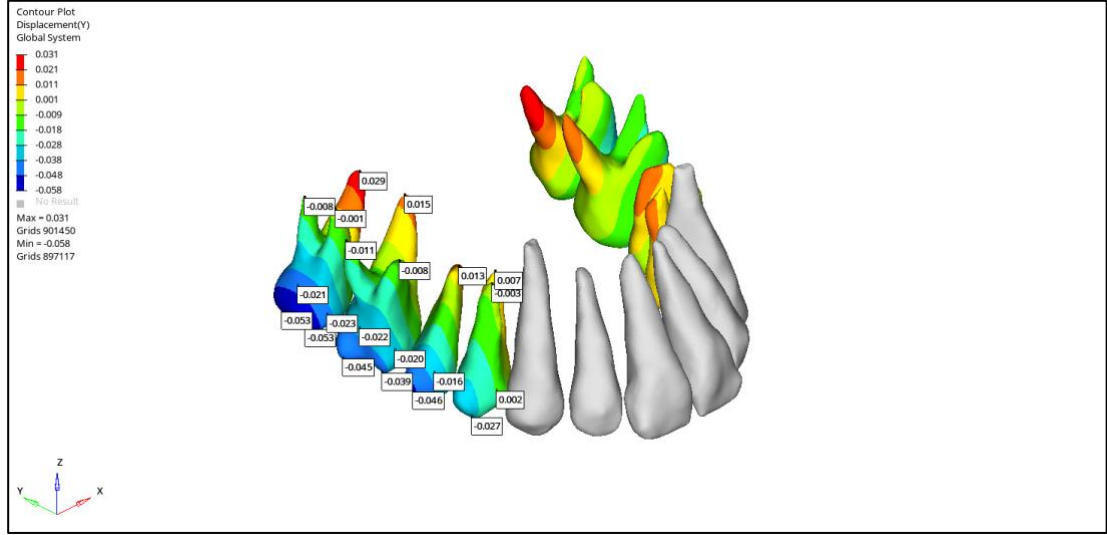
İkinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.9’te verilmektedir.



Şekil 4.9: İkinci grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 2’de Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

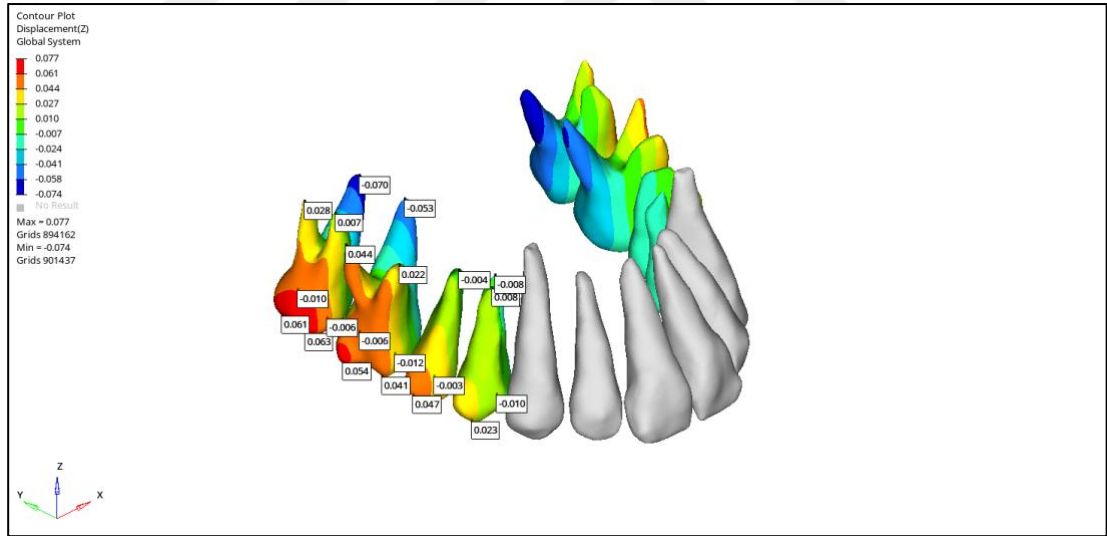
İkinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.10’da verilmektedir.



Şekil 4.10: İkinci grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 2’de Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

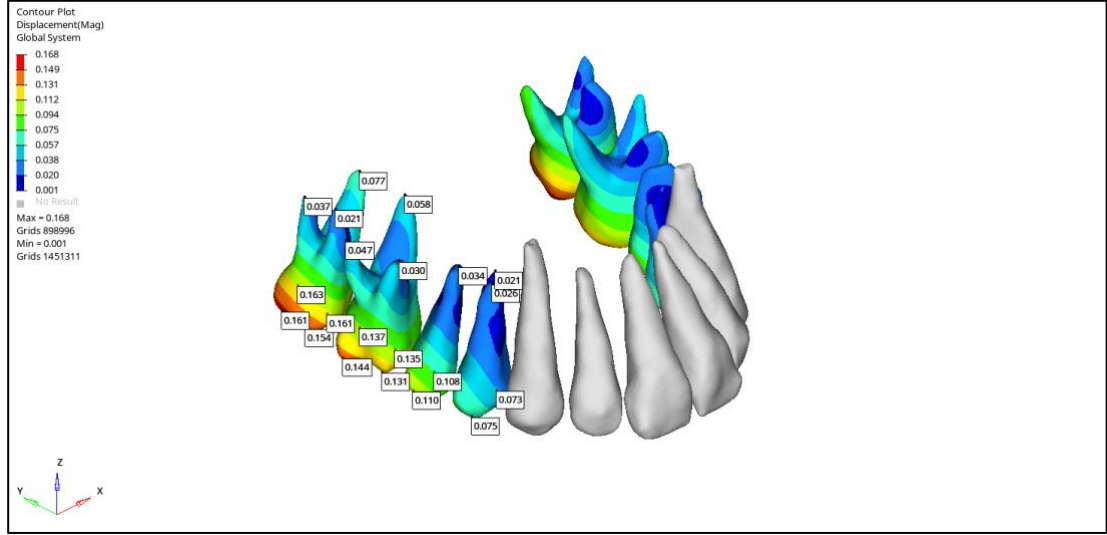
İkinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.11’de verilmektedir.



Şekil 4.11: İkinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 2’de Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

İkinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12: İkinci grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.4 Grup 3

Bukkal yüzeyde optimize ekspansiyon destek ataşmanı bulunan üçüncü grupta, maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’de belirlenen referans noktadaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.4’te “mm” cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.4: Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.068	-0.028	0.023	0.077
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.074	0.002	-0.01	0.075
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.026	-0.003	0.008	0.027
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.018	0.007	-0.009	0.021
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.09	-0.047	0.048	0.112

Tablo 4.4 (devamı): Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.

2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.109	-0.017	-0.003	0.110
2. Premolar Kök Apeksi	0.032	0.013	-0.04	0.035
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.121	-0.039	0.41	0.134
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.128	-0.045	0.054	0.146
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.136	-0.021	-0.012	0.138
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.138	-0.023	-0.007	0.140
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.017	-0.008	0.022	0.029
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.012	-0.011	0.044	0.047
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.018	0.015	-0.054	0.059
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.132	-0.054	0.064	0.157
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.142	-0.055	0.061	0.164
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.162	-0.024	-0.006	0.164
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.164	-0.022	-0.01	0.166
2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.019	-0.001	0.007	0.021

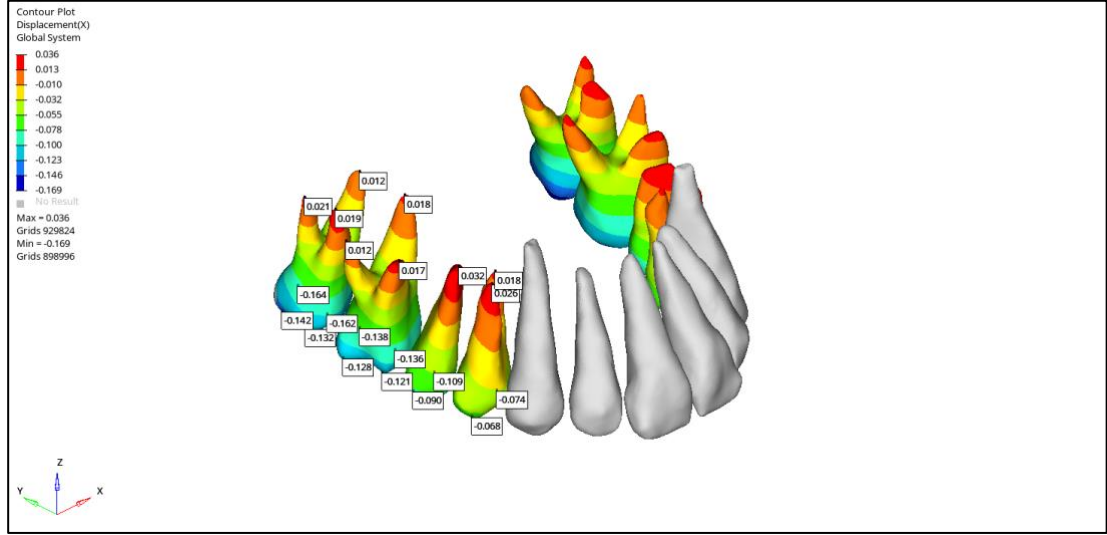
Tablo 4.4 (devamı): Üçüncü gruba ait diş hareketi değerleri.

2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.021	-0.008	0.028	0.036
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.012	0.03	-0.071	0.078

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatine hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.136 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.018 mm palatine hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.121 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.017 mm palatine hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.162 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.012 mm palatine hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.012 mm ile birinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Grup 3'te X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

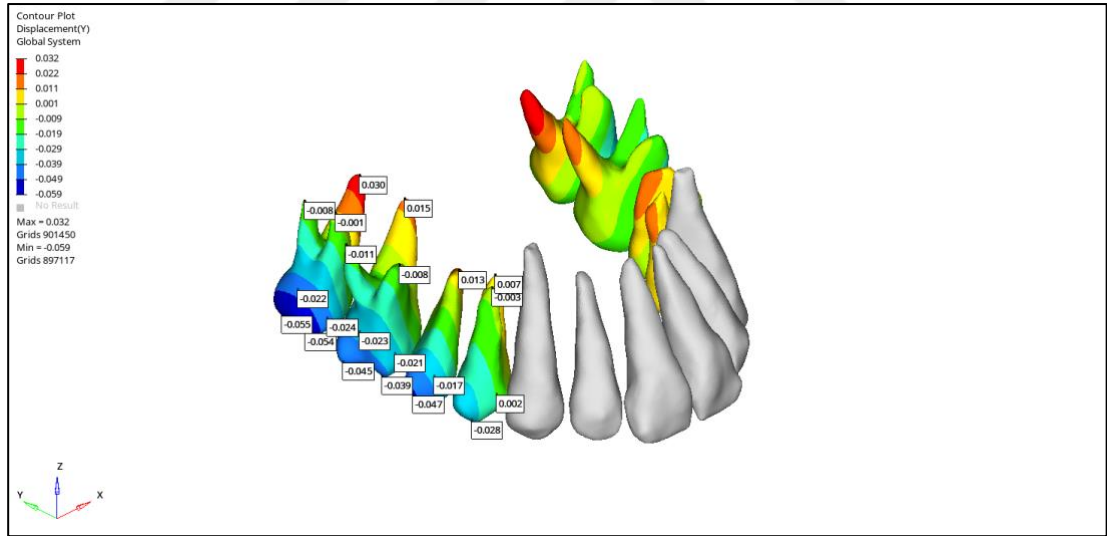
Üçüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.13'te verilmektedir.



Şekil 4.13: Üçüncü grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 3'te Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

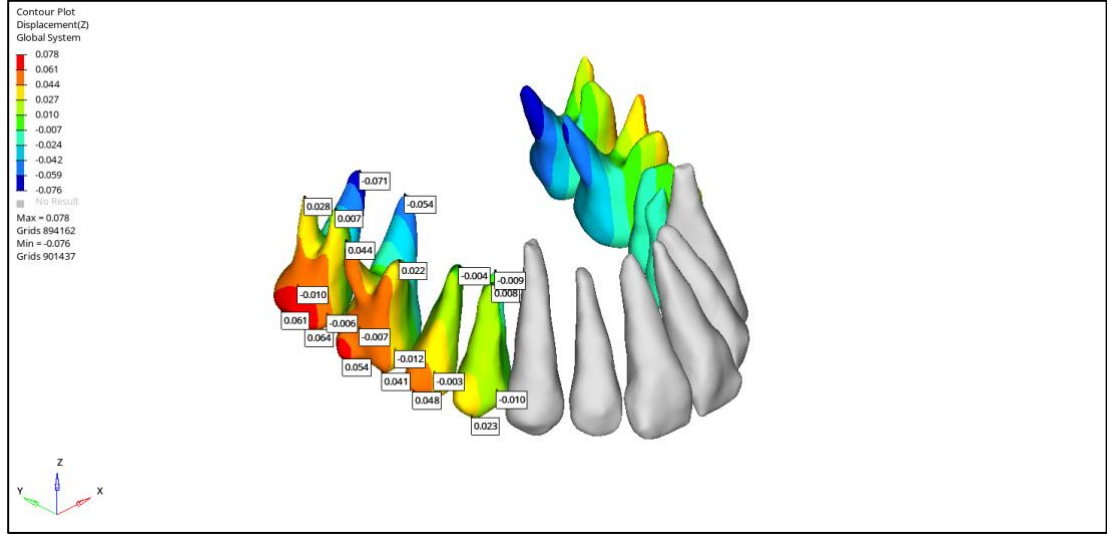
Üçüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.14'te verilmektedir.



Şekil 4.14: Üçüncü grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 3'te Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

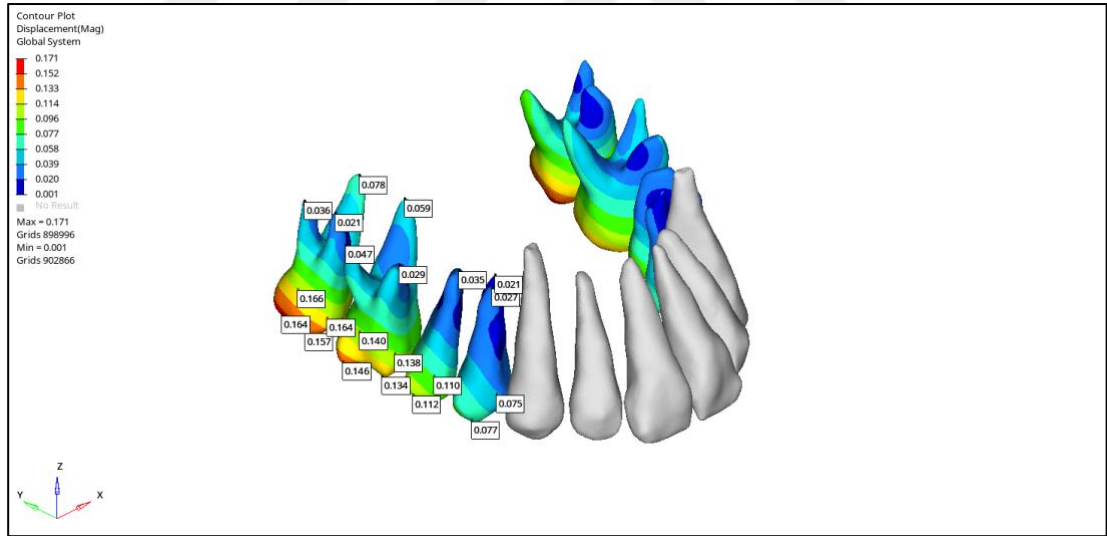
Üçüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.15'te verilmektedir.



Şekil 4.15: Üçüncü grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 3'te Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

Üçüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16: Üçüncü grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.5 Grup 4

Optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak, palatinal yüzeyde pkluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman bulunan dördüncü grupta, maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de belirlenen referans noktalardaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.5'te "mm" cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.5: Dördüncü gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.074	-0.03	0.026	0.084
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.081	0.002	-0.011	0.081
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.024	-0.004	0.009	0.026
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.017	0.007	-0.008	0.02
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.098	-0.051	0.052	0.122
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.119	-0.018	-0.003	0.120
2. Premolar Kök Apeksi	0.028	0.014	-0.006	0.032
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.132	-0.043	0.045	0.146
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.139	-0.049	0.059	0.159
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.148	-0.022	-0.013	0.150
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.15	-0.025	-0.007	0.152
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.016	-0.008	0.02	0.027
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.013	-0.012	0.048	0.051

Tablo 4.5 (devamı): Dördüncü gruba ait diş hareketi değerleri.

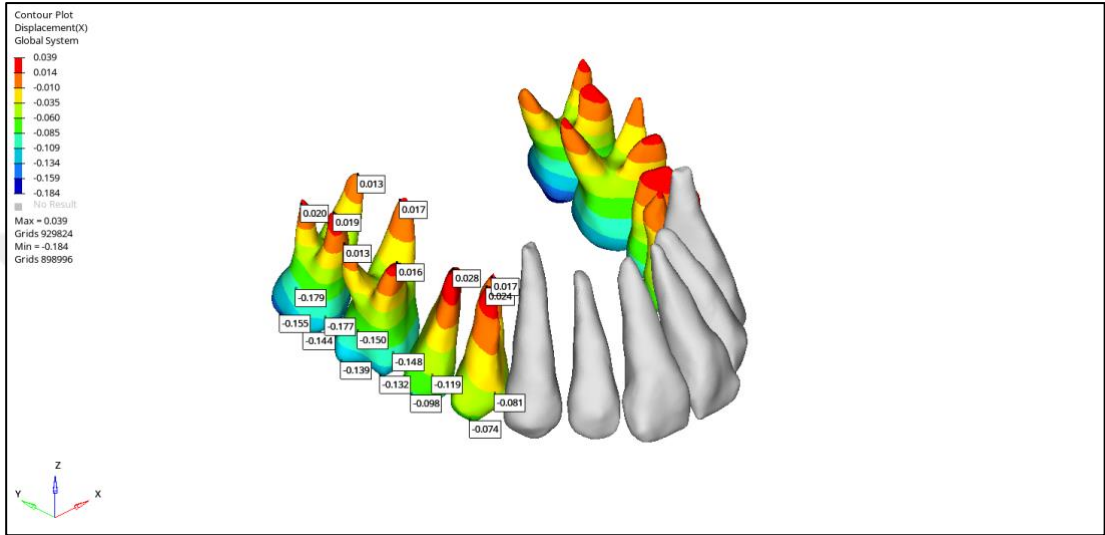
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.017	0.015	-0.056	0.061
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.144	-0.059	0.069	0.171
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.155	-0.059	0.066	0.178
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.177	-0.026	-0.007	0.179
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.179	-0.024	-0.011	0.181
2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.019	-0.001	0.006	0.02
2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.0120	-0.012	0.036	0.043
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.013	0.003	-0.078	0.085

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.148 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.017 mm palatinal hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.132 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.016 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.177 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.013 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.013 mm ile birinci molar dişin

meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Grup 4'te X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

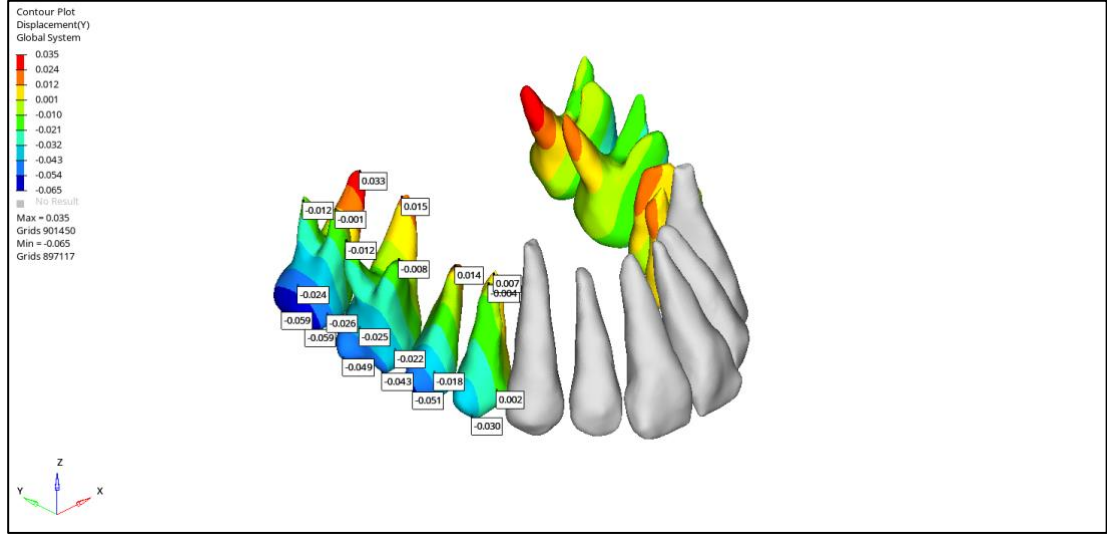
Dördüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.17'te verilmektedir.



Şekil 4.17: Dördüncü grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 4'te Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

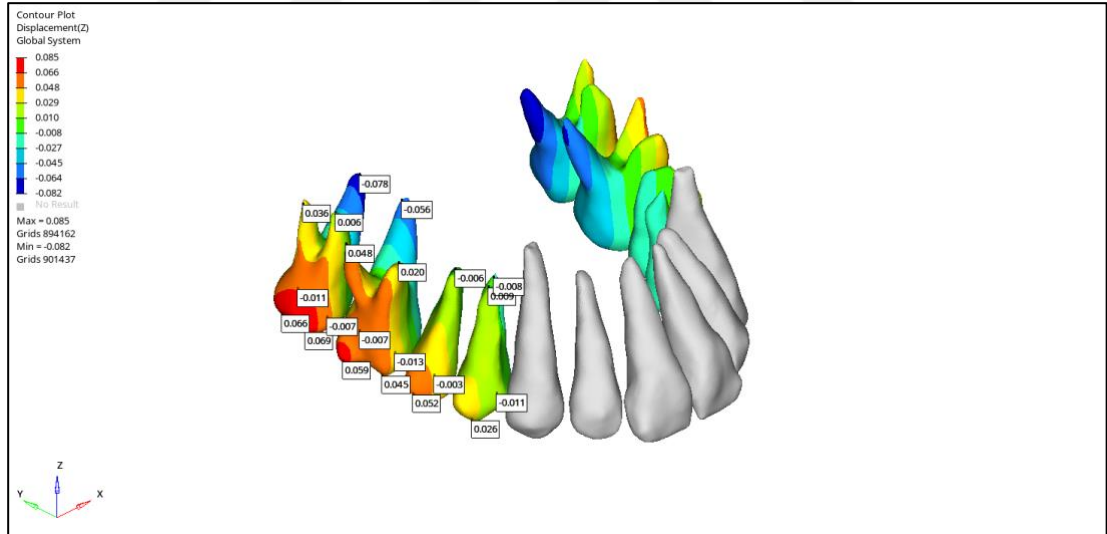
Dördüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.18'te verilmektedir.



Şekil 4.18: Dördüncü grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 4'te Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

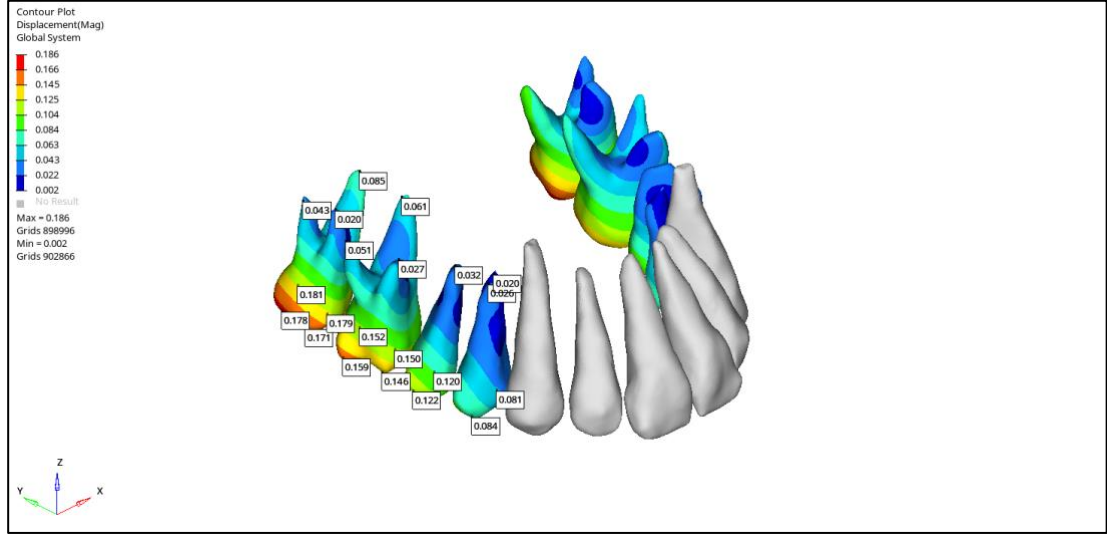
Dördüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.19: Dördüncü grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 4'te Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

Dördüncü grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.10: Dördüncü grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.6 Grup 5

Optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak, palatinal yüzeyde horizontal dikdörtgen ataşman buluna beşinci grupta maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te belirlenen referans noktadaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.6’da “mm” cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.6: Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.071	-0.029	0.025	0.081
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.077	0.002	-0.011	0.078
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.027	-0.003	0.008	0.028
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.019	0.008	-0.009	0.022

Tablo 4.6 (devamı): Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.

2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.094	-0.049	0.05	0.117
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.114	-0.017	-0.003	0.116
2. Premolar Kök Apeksi	0.032	0.013	-0.004	0.035
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.129	-0.041	0.043	0.14
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.134	-0.047	0.057	0.153
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.144	-0.021	-0.013	0.145
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.144	-0.024	-0.007	0.147
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.018	-0.009	0.023	0.031
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.013	-0.012	0.046	0.049
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.019	0.016	-0.057	0.062
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.139	-0.057	0.067	0.165
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.149	-0.057	0.064	0.172
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.171	-0.025	-0.007	0.173
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.173	-0.023	-0.011	0.175

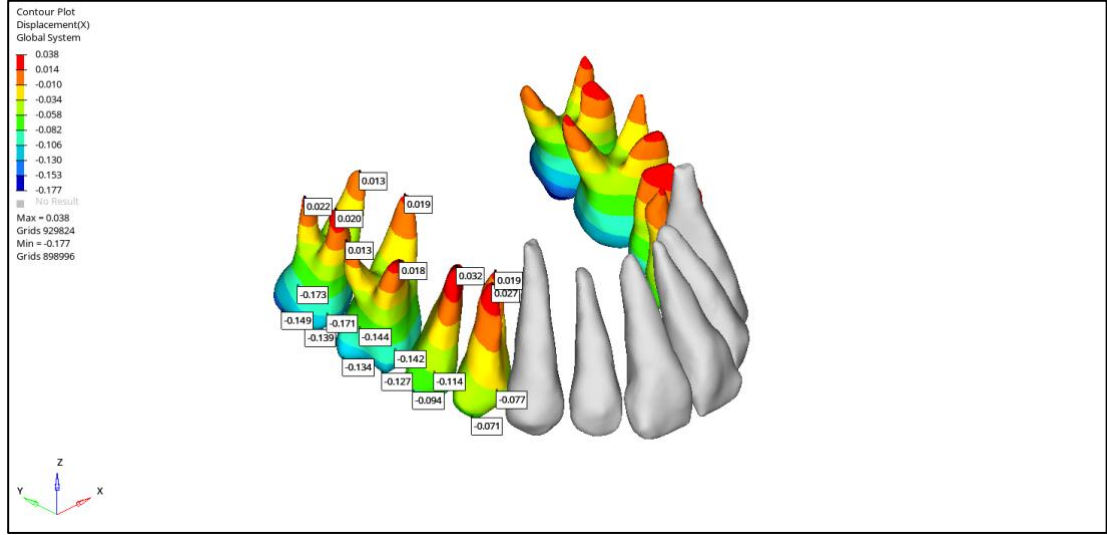
Tablo 4.6 (devamı): Beşinci gruba ait diş hareketi değerleri.

2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.02	-0.001	0.007	0.022
2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.022	-0.009	0.03	0.038
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.013	0.032	-0.075	0.082

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatina hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.144 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.019 mm palatina hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.129 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.018 mm palatina hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.171 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.013 mm palatina hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.013 mm ile birinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Grup 5'te X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

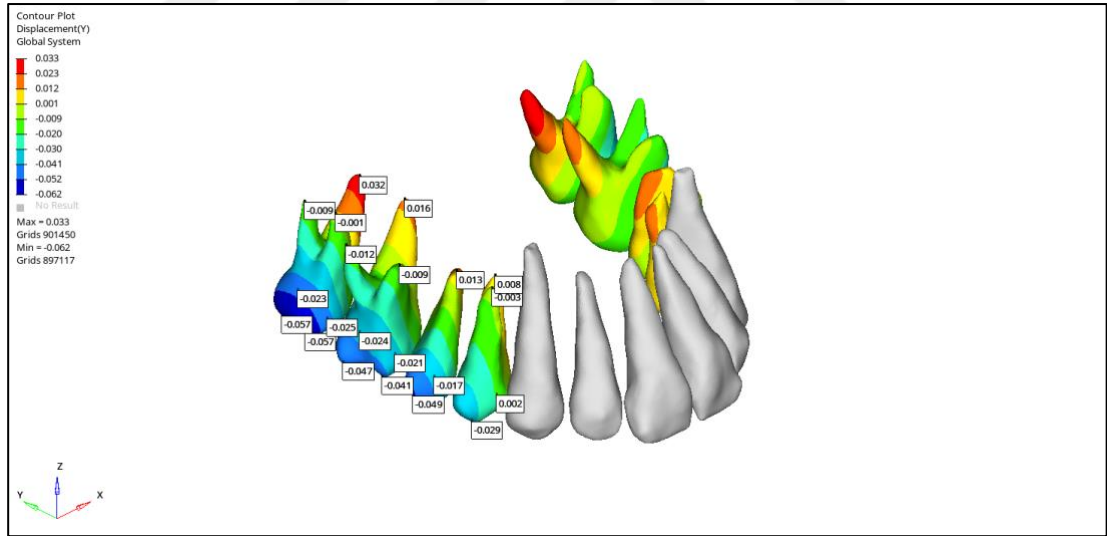
Beşinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.21'de verilmektedir.



Şekil 4.21: Beşinci grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 5'te Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

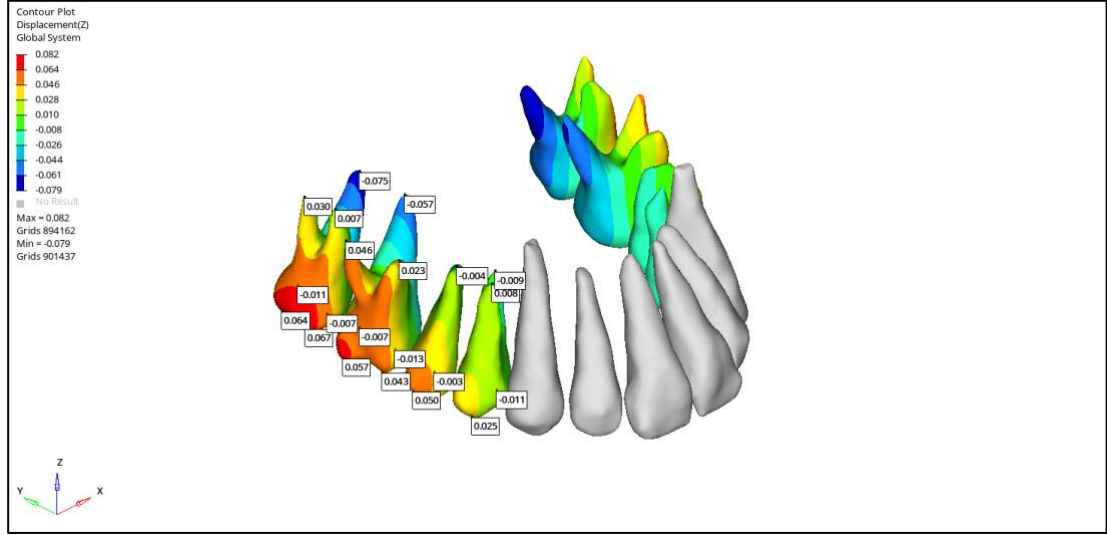
Beşinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.22'de verilmektedir.



Şekil 4.22: Beşinci grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 5'te Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

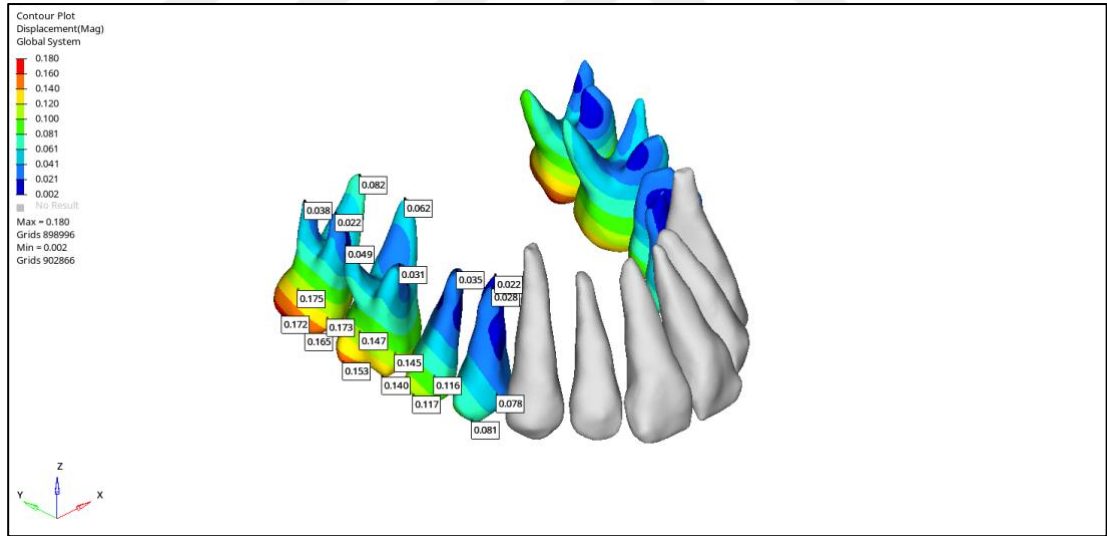
Beşinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.23'te verilmektedir.



Şekil 4.23: Beşinci grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 5'te Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

Beşinci grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.24'te verilmektedir.



Şekil 4.24: Beşinci grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.7 Grup 6

Bukkal yüzeyde ataşman bulunmayan, palatinal yüzeyde horizontal dikdörtgen ataşman bulunan altıncı grupta, maksiller dentisyonda değerlendirilen dişlerin Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de belirlenen referans noktalardaki X-Y-Z eksen ve total yer değiştirme miktarları Tablo 4.7'de "mm" cinsinden verilmektedir.

Tablo 4.7: Altıncı gruba ait diş hareketi değerleri.

Ölçüm Yapılan Nokta	X Eksenindeki Hareket Miktarı	Y Eksenindeki Hareket Miktarı	Z Eksenindeki Hareket Miktarı	Total Yer Değiştirme
1. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.058	-0.023	0.02	0.066
1. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.064	0.002	-0.009	0.064
1. Premolar Bukkal Kök Apeksi	0.022	-0.003	0.007	0.023
1. Premolar Palatinal Kök Apeksi	0.016	0.006	-0.007	0.018
2. Premolar Bukkal Tüberkül Tepesi	-0.077	-0.04	0.041	0.096
2. Premolar Palatinal Tüberkül Tepesi	-0.094	-0.014	-0.002	0.095
2. Premolar Kök Apeksi	0.028	0.011	-0.003	0.03
1. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.104	-0.034	0.036	0.225
1. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.111	-0.039	0.048	0.127
1. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.117	-0.017	-0.011	0.119
1. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.119	-0.019	-0.006	0.121
1. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.017	-0.007	0.02	0.027
1. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.012	-0.01	0.039	0.042

Tablo 4.7 (devamı): Altıncı gruba ait diş hareketi değerleri.

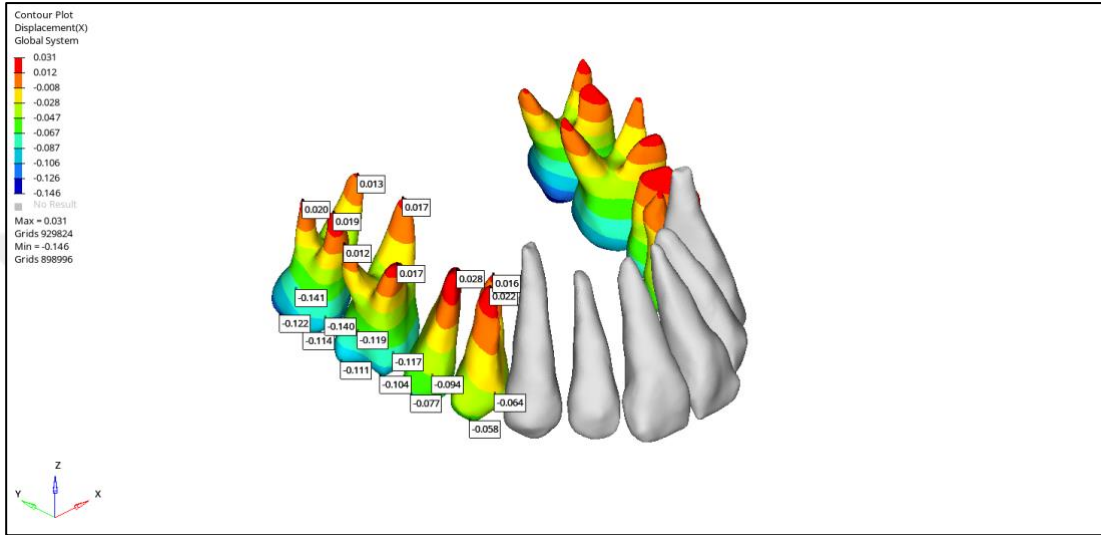
1. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.017	0.013	-0.047	0.052
2. Molar Meziobukkal Tüberkül Tepesi	-0.114	-0.047	0.056	0.136
2. Molar Distobukkal Tüberkül Tepesi	-0.122	-0.047	0.054	0.141
2. Molar Meziopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.14	-0.02	-0.005	0.142
2. Molar Distopalatinal Tüberkül Tepesi	-0.141	-0.019	-0.009	0.143
2. Molar Meziobukkal Kök Apeksi	0.019	-0.001	0.007	0.02
2. Molar Distobukkal Kök Apeksi	0.02	-0.007	0.025	0.033
2. Molar Palatinal Kök Apeksi	0.013	0.026	-0.062	0.068

Tüm dişlerde kuronlar bukkale, kökler palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme görülmektedir. Birinci molar dişin, meziopalatinal tüberkül tepesi 0.117 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.019 mm palatinal hareket etmektedir. Birinci molar dişin meziobukkal tüberkül tepesi 0.104 mm bukkale hareket ederken meziobukkal kök apeksi 0.017 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesi 0.140 mm bukkale hareket ederken, palatinal kök apeksi 0.013 mm palatinal hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi hariç bütün dişlerin kuronları ve bukkal kök apeksleri meziale hareket etmektedir. İkinci premolar dişin palatinal tüberkül tepesi ve tüm dişlerin palatinal kök apeksleri distale hareket etmektedir. Tüm dişlerin bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, tüm dişlerin palatinal tüberkül tepeleri ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmektedir. En fazla ekstrüzyon gözlemlenen tüberkül tepesi 0.011 mm ile birinci molar dişin

meziopalatinal tüberkül tepesidir. En fazla total hareket gösteren referans noktası ikinci molar dişin distobukkal tüberkül tepesidir.

Grup 6'da X Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

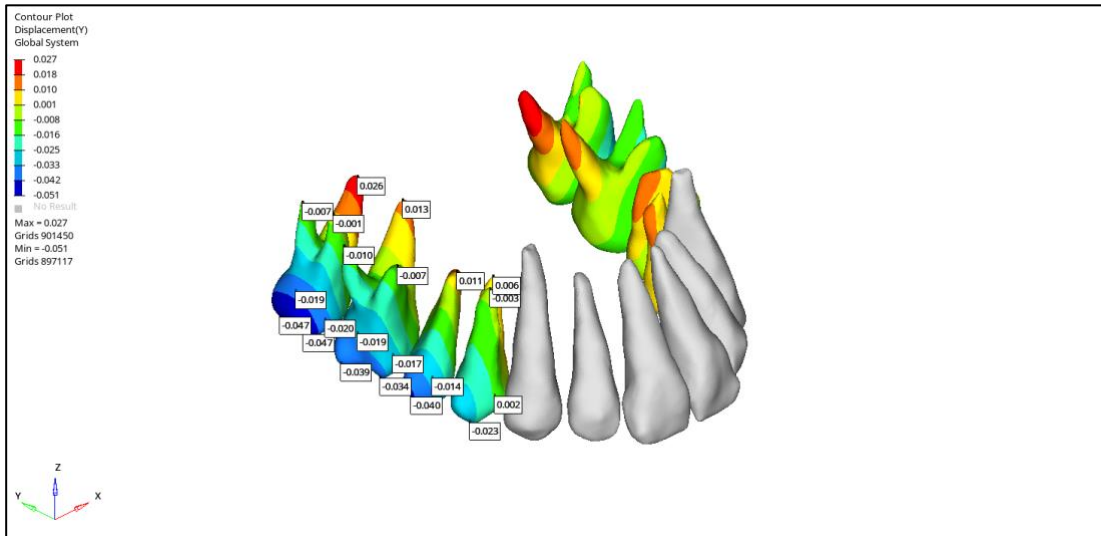
Altıncı grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin X ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.25'te verilmektedir.



Şekil 4.25: Altıncı grupta X ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 6'da Y Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

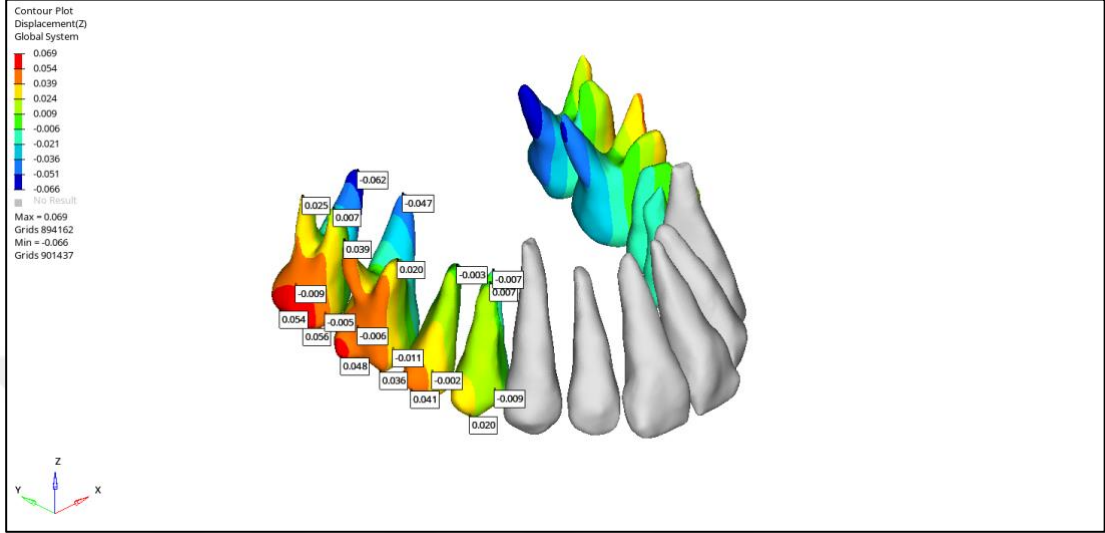
Altıncı grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Y ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.26'da verilmektedir.



Şekil 4.26: Altıncı grupta Y ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 6'da Z Ekseninde Meydana Gelen Yer Değiştirme Değerleri:

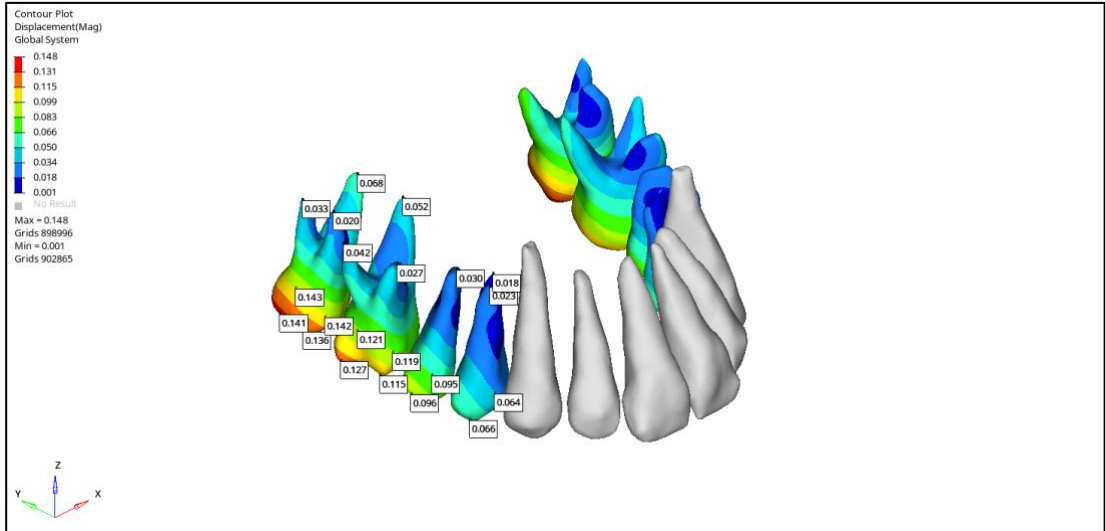
Altıncı grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin Z ekseninde yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan yer değiştirme miktarları Şekil 4.27'de verilmektedir.



Şekil 4.27: Altıncı grupta Z ekseninde yer değiştirme miktarları.

Grup 6'da Meydana Gelen Total Yer Değiştirme Değerleri:

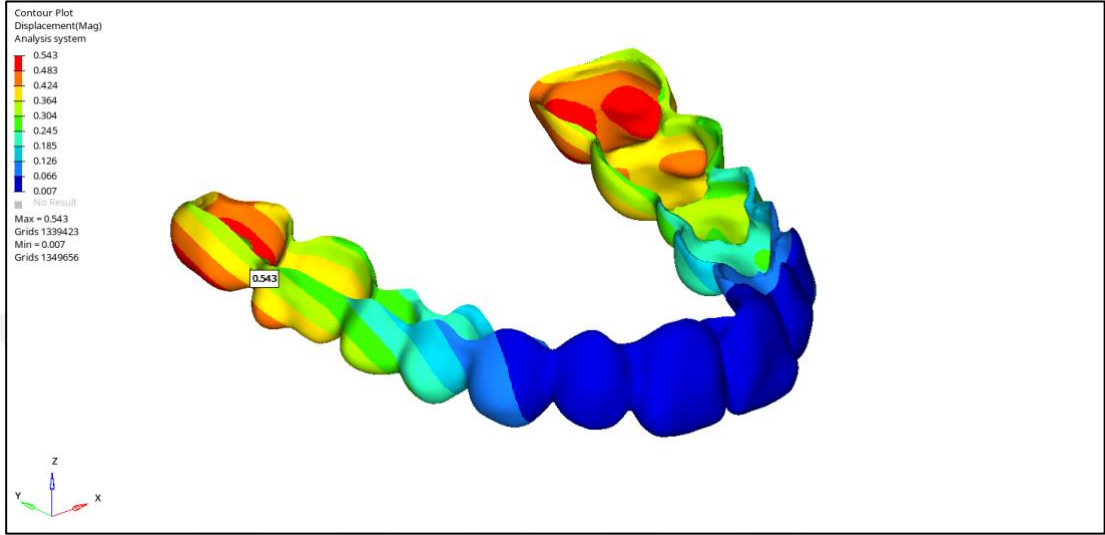
Altıncı grupta, maksiller dentisyondaki belirlenen dişlerin yer değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla belirlenen referans noktalarda oluşan total yer değiştirme miktarları Şekil 4.28'de verilmektedir.



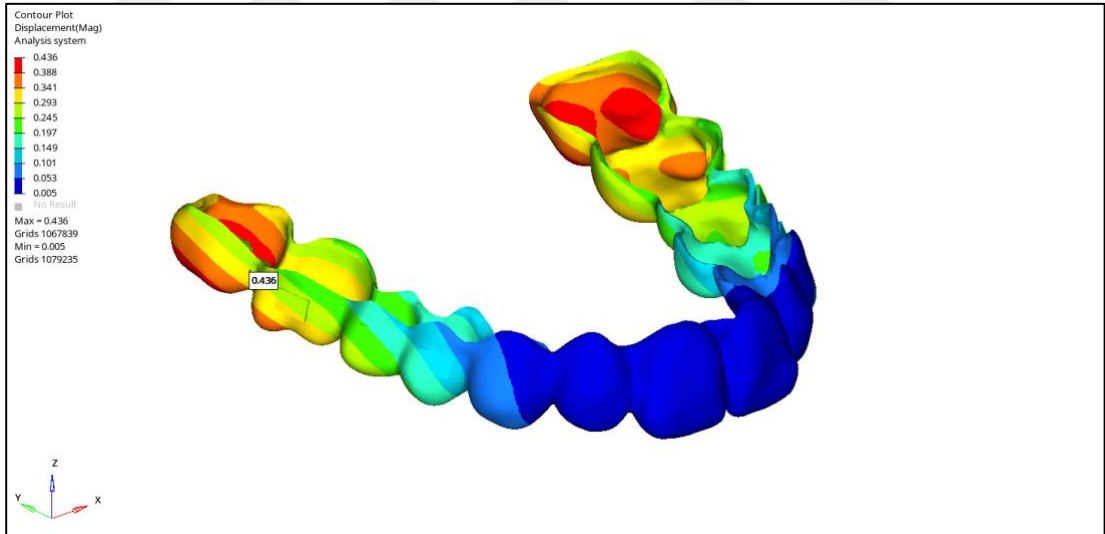
Şekil 4.28: Altıncı grupta total yer değiştirme miktarları.

4.1.8 Şeffaf plağa ait deformasyon değerleri

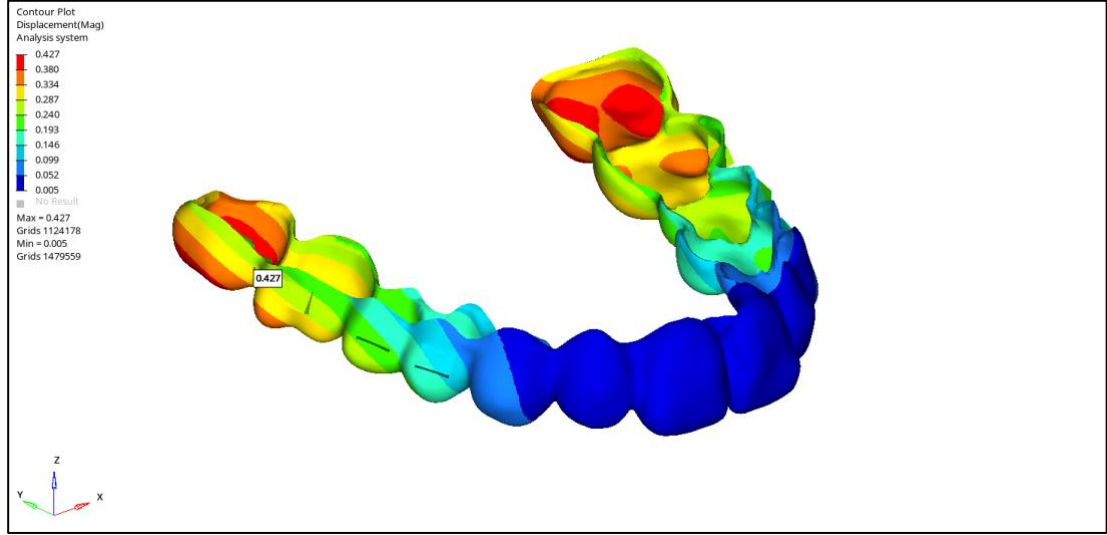
Tüm gruplarda şeffaf plağa ait deformasyon değerlerinde, en yüksek değer ikinci molar dişin palatinal tüberkül tepesi çevresinde görülmektedir. Grup 4 şeffaf plak deformasyonu en az görülen grup olmuştur. Kontrol grubunda ise şeffaf plak deformasyonu en yüksek değerde görülmüştür.



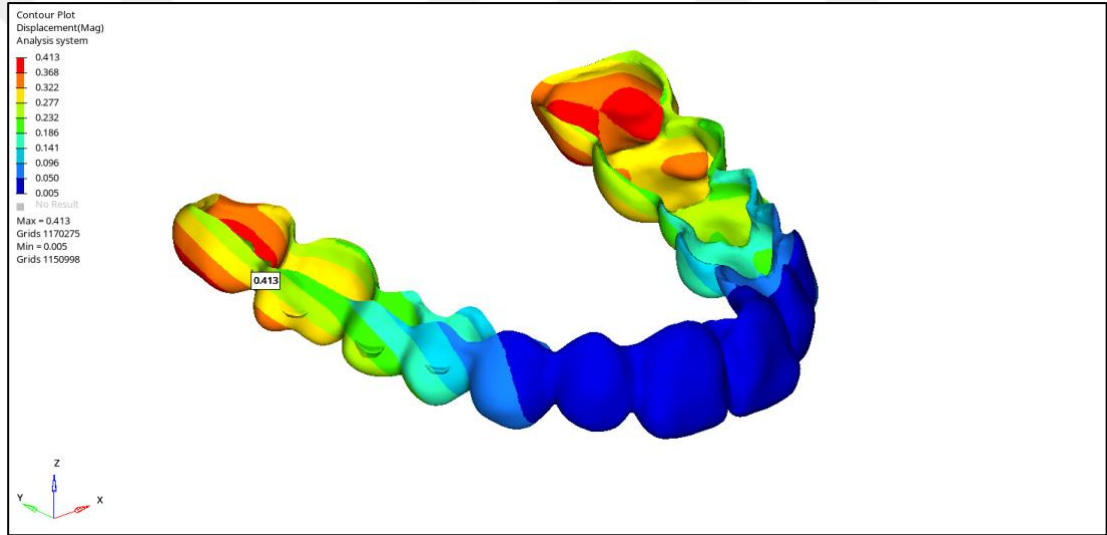
Şekil 4.29: Kontrol grubunda şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



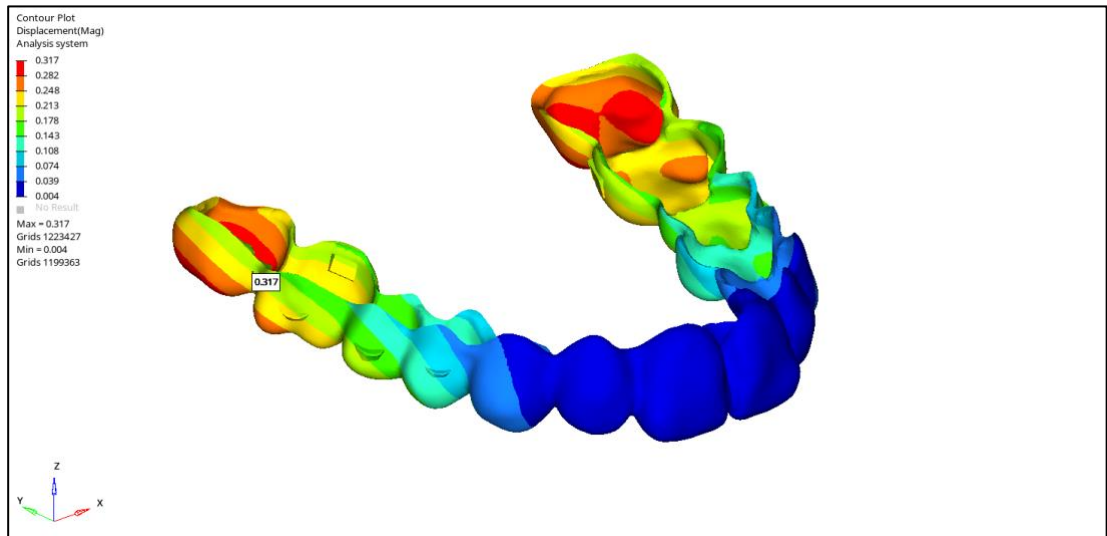
Şekil 4.30: Grup 1'deki şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



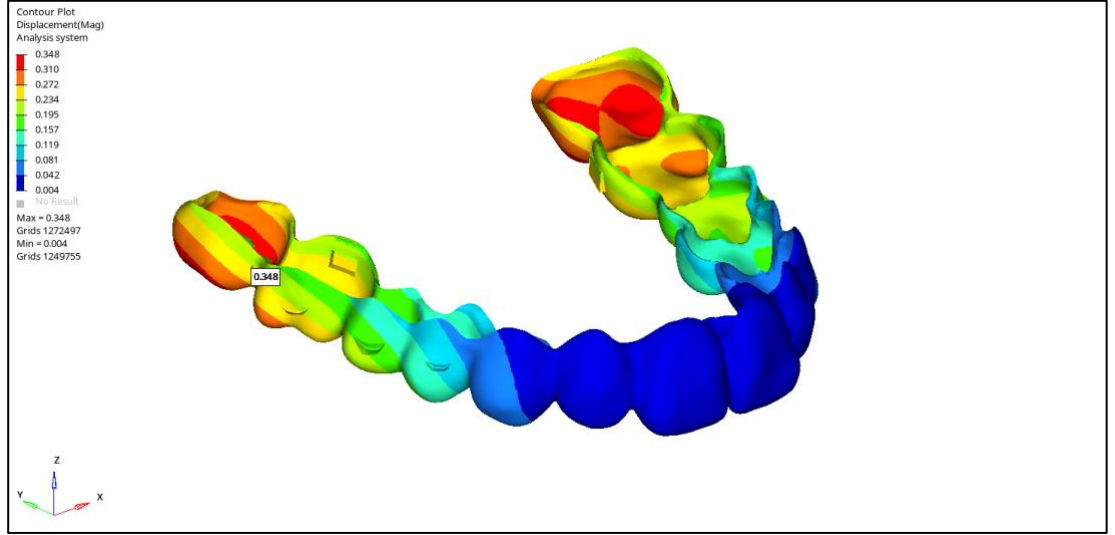
Şekil 4.31: Grup 2’de şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



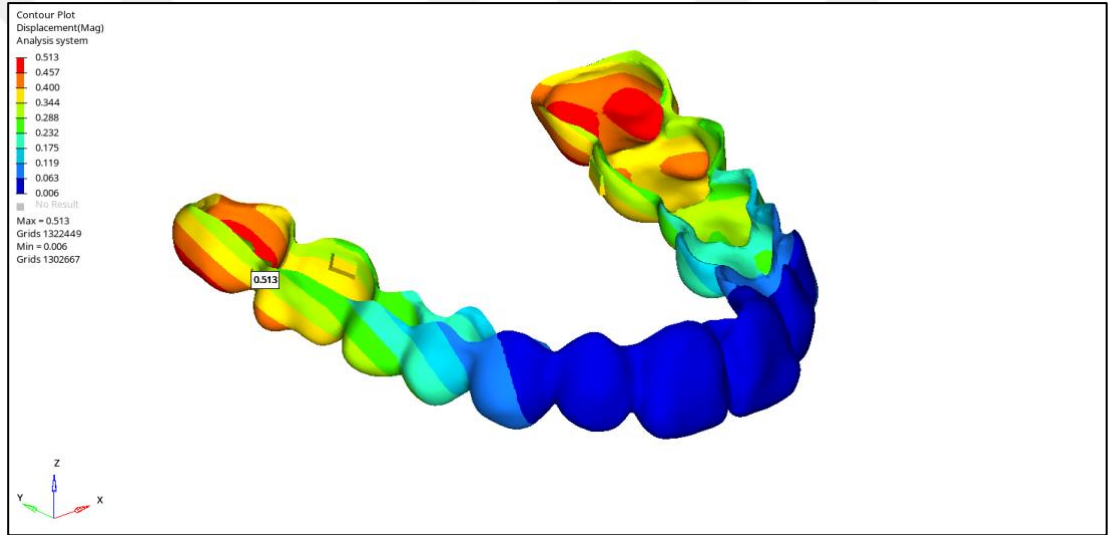
Şekil 4.32: Grup 3’te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



Şekil 4.33: Grup 4’te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



Şekil 4.34: Grup 5'te şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.



Şekil 4.35: Grup 6'da şeffaf plağa ait yer değiştirme değerleri.

4.2 Dişlerin ve Periodontal Ligamentin Von Mises, Maksimum Principal ve Minimum Principal Stres Değerleri

4.2.1 Dişlere ait von mises stres değerleri

Kontrol Grubu: En yüksek değer birinci molar dişin meziobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 1: En yüksek değer ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 2: En yüksek değer ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 3: En yüksek değer ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 4: En yüksek değer ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 5: En yüksek değer ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

Grup 6: En yüksek değer birinci molar dişin meziobukkal kuron bölgesinde, en düşük değer ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir.

4.2.2 PDL'ye ait maksimum ve minimum principal stres değerleri

Maksimum Principal (Çekme-Tension):

Kontrol Grubu: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 1: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 2: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 3: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 4: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 5: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Grup 6: En yüksek değer ikinci molar dişin kök apeksinde görülürken, en düşük değer molar dişlerin furkasyon bölgesinde görülmektedir.

Minimum Principal (Baskı-Compression):

Kontrol Grubu: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

Grup 1: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

Grup 2: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

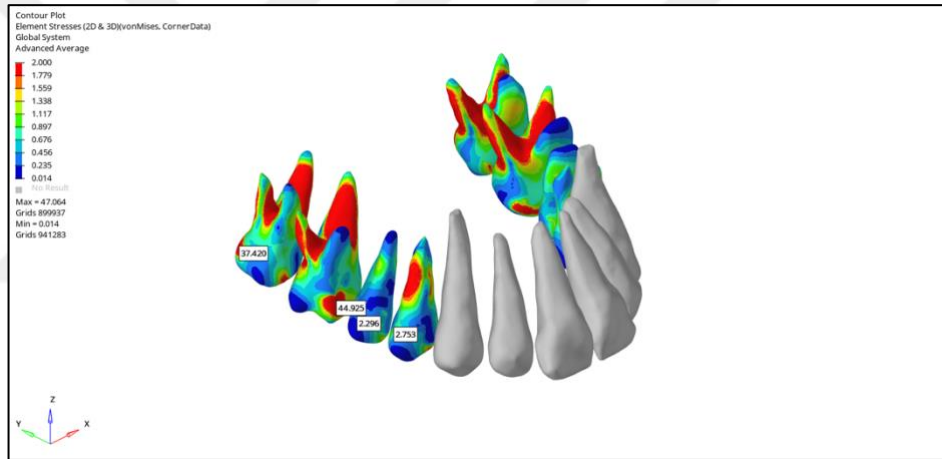
Grup 3: En yüksek değer ikinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

Grup 4: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

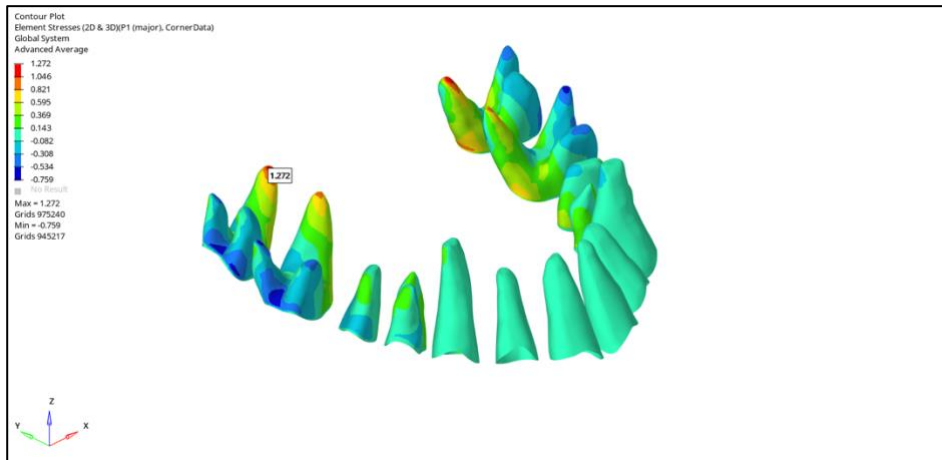
Grup 5: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin kök palatinal apeksinde görülmektedir.

Grup 6: En yüksek değer birinci molar dişin bukkal furkasyon bölgesinde görülürken, en düşük değer ikinci molar dişin palatinal kök apeksinde görülmektedir.

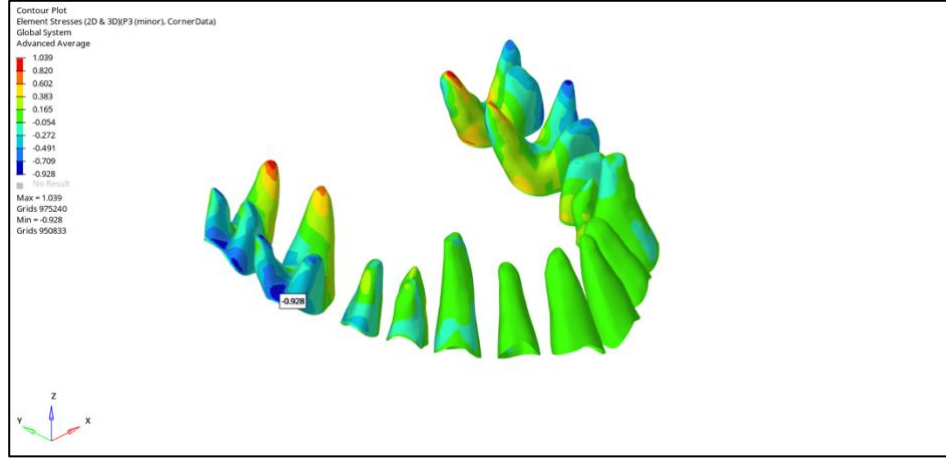
Kontrol Grubu:



şekil 4.36: Kontrol grubuna ait Von Mises değerleri.

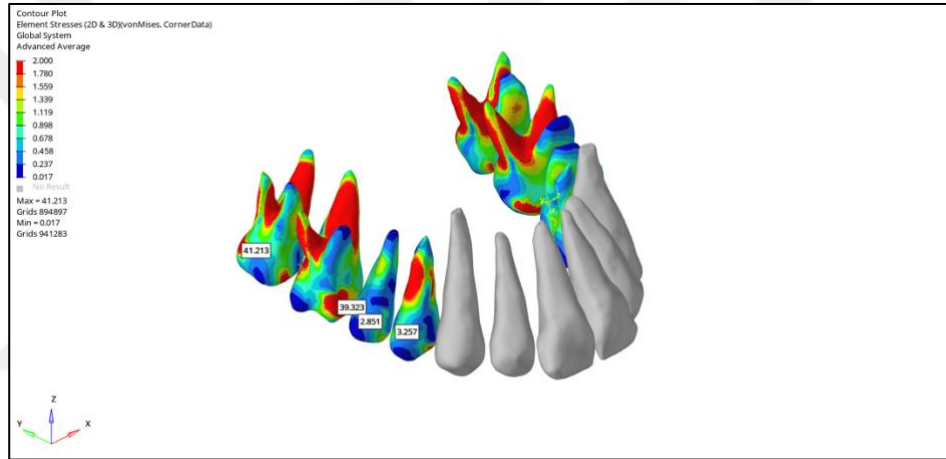


şekil 4.37: Kontrol grubuna ait maksimum principal değerleri.

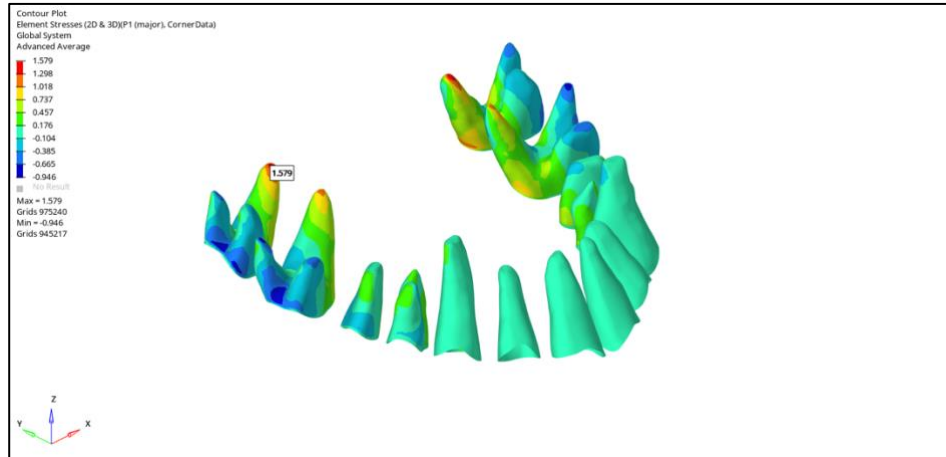


Şekil 4.38: Kontrol grubuna ait minimum principal değerleri.

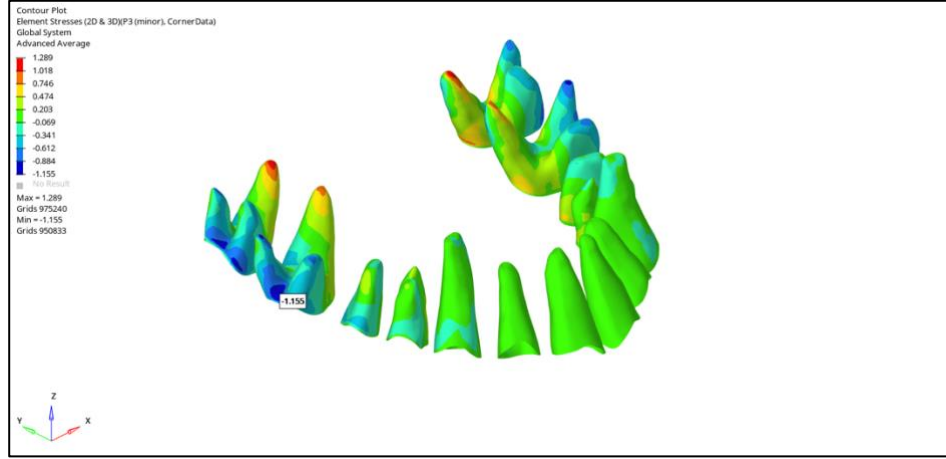
Grup 1:



Şekil 4.39: Grup 1'e ait Von Mises değerleri

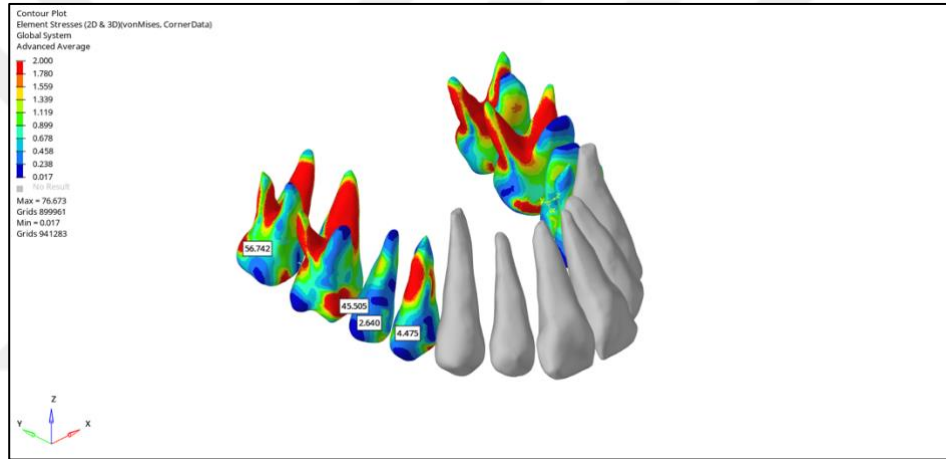


Şekil 4.40: Grup 1'e ait maksimum principal değerleri

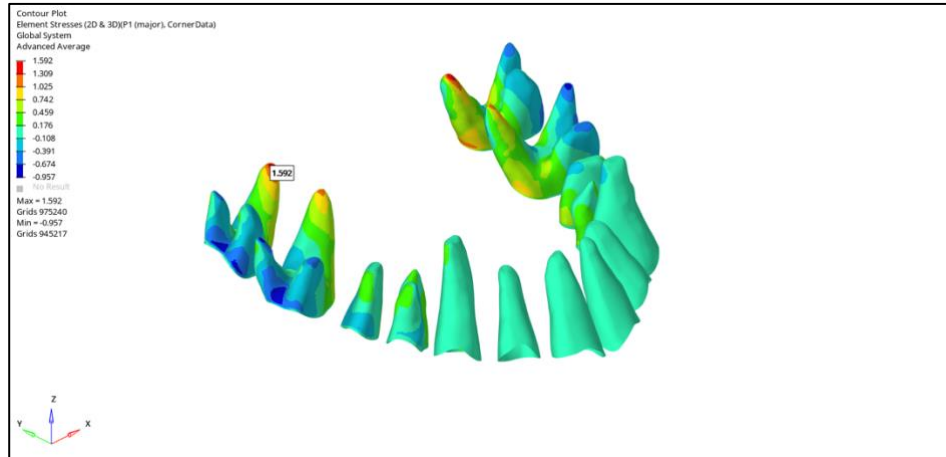


Şekil 4.41: Grup 1'e ait minimum principal değerleri

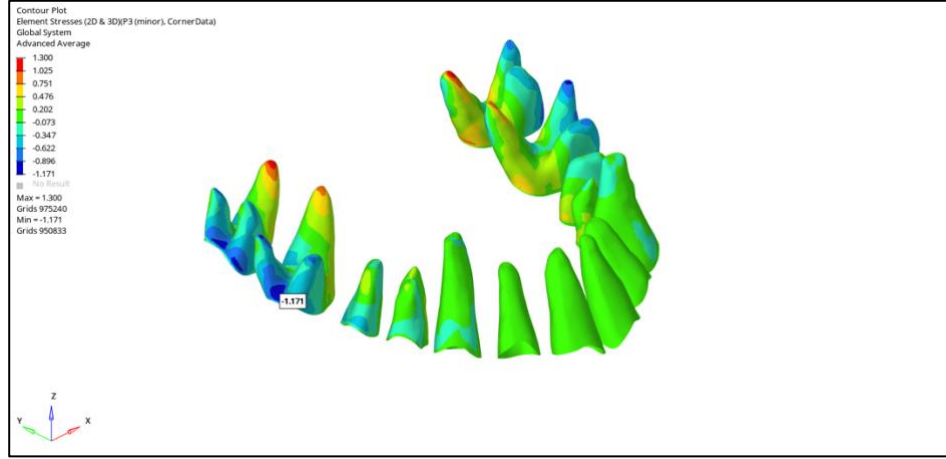
Grup 2:



Şekil 4.42: Grup 2'ye ait Von Mises değerleri.

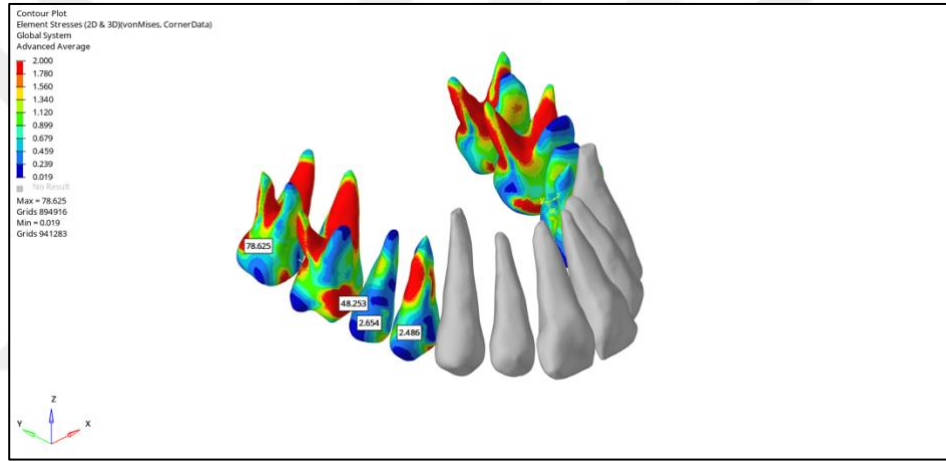


Şekil 4.43: Grup 2'ye ait maksimum principal değerleri.

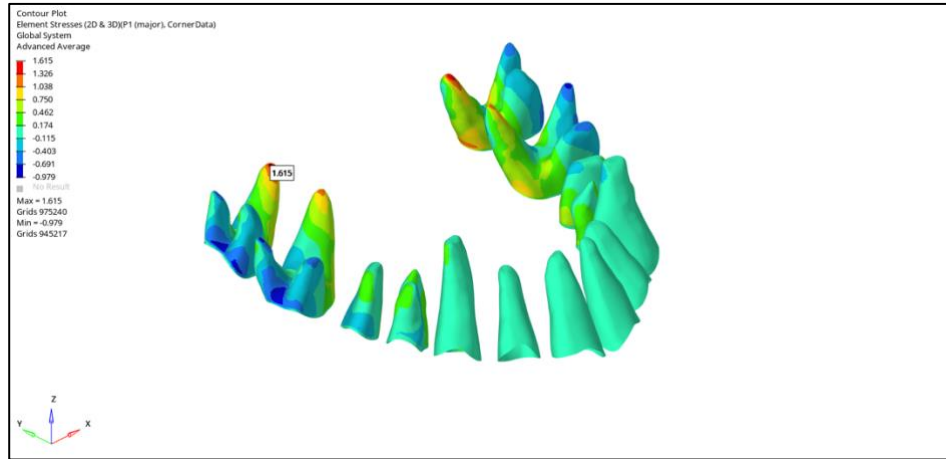


Şekil 4.44: Grup 2'ye ait minimum principal değerleri.

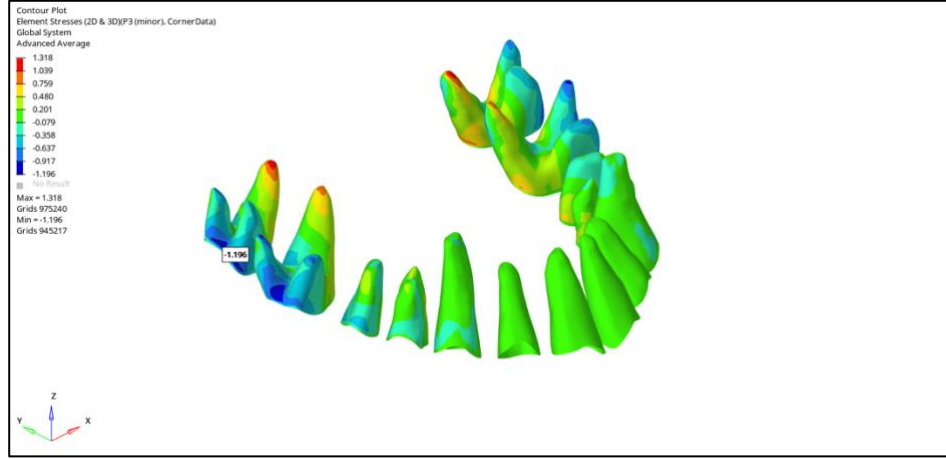
Grup 3:



Şekil 4.45: Grup 3'e ait Von Mises değerleri.

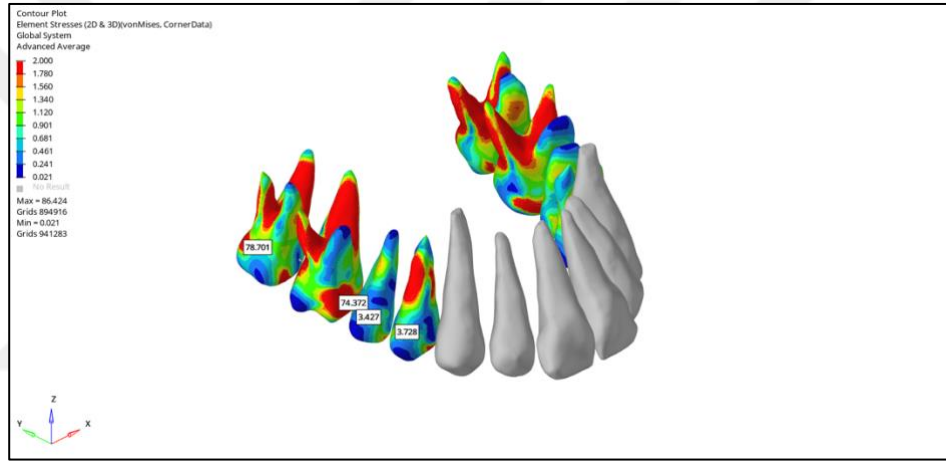


Şekil 4.46: Grup 3'e ait maksimum principal değerleri.

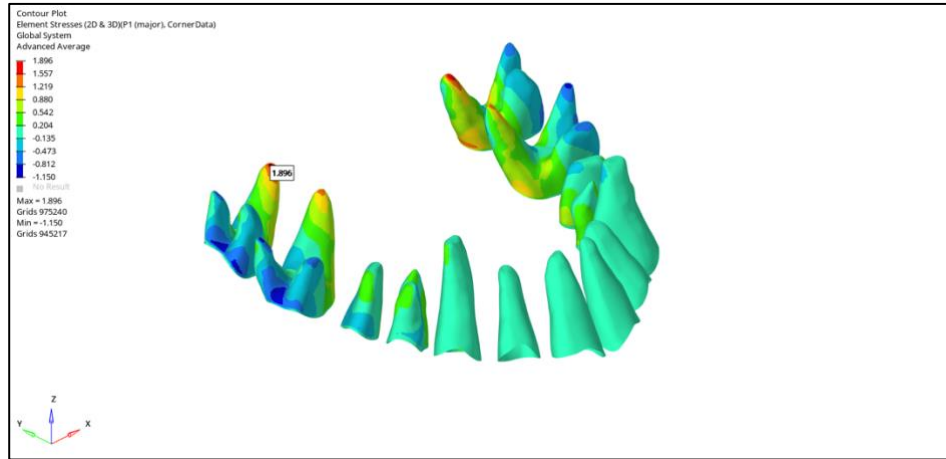


Şekil 4.47: Grup 3'e ait minimum principal değerleri.

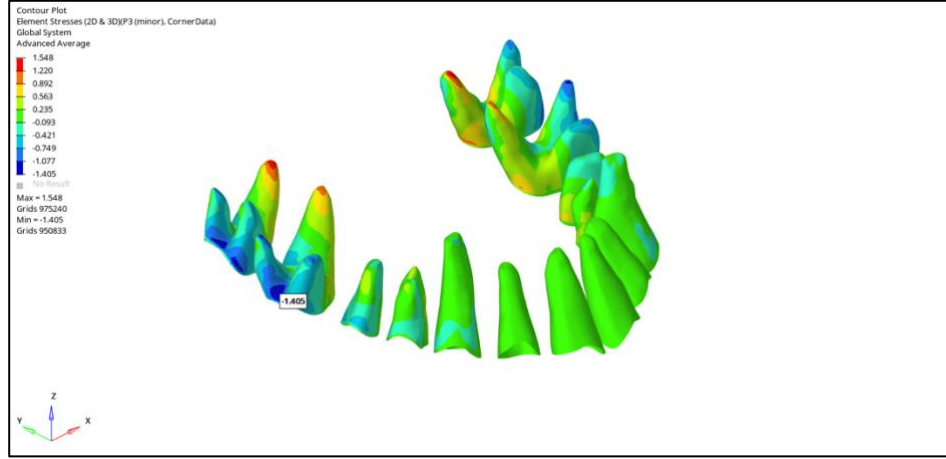
Grup 4:



Şekil 4.48: Grup 4'e ait Von Mises değerleri.

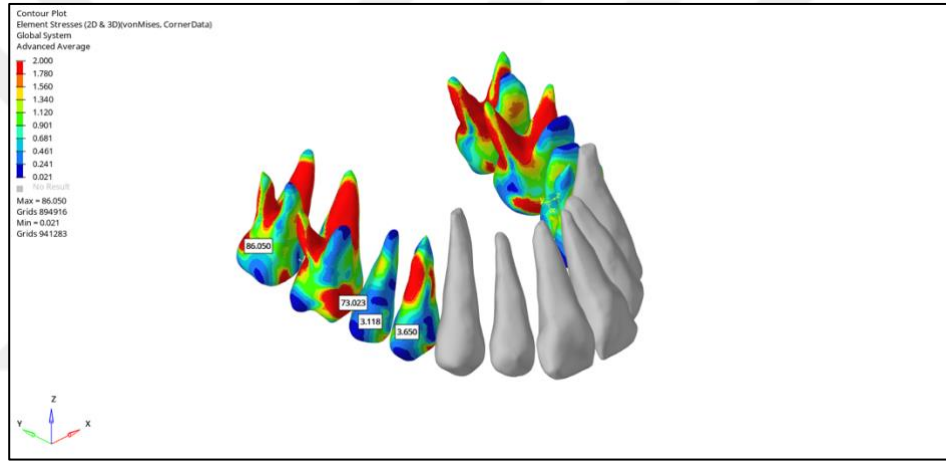


Şekil 4.49: Grup 4'e ait maksimum principal değerleri.

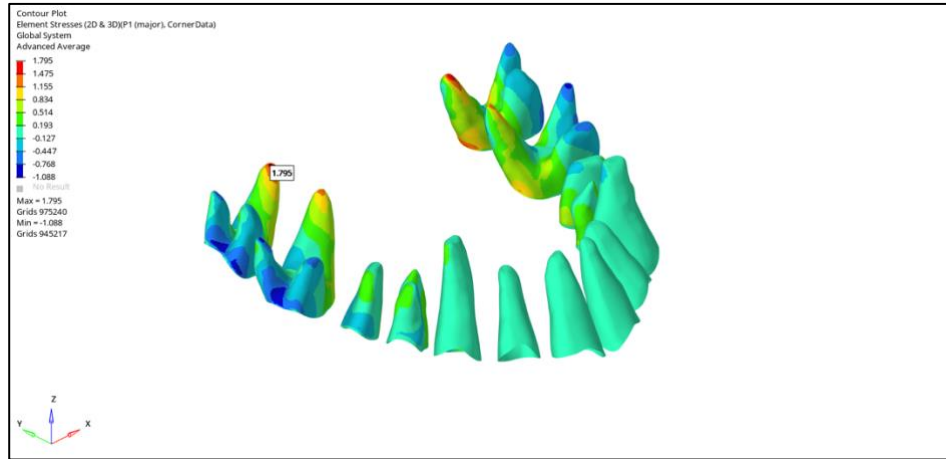


Şekil 4.47: Grup 4'e ait maksimum principal değerleri.

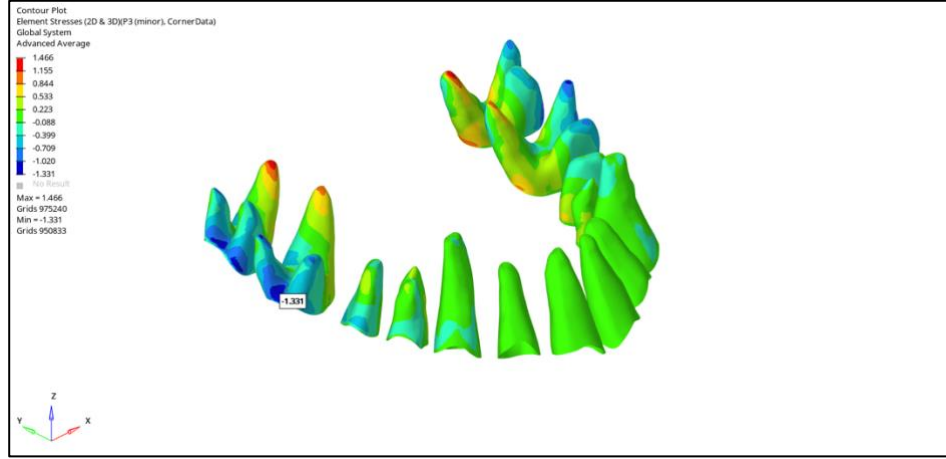
Grup 5:



Şekil 4.48: Grup 5'e ait Von Mises değerleri.

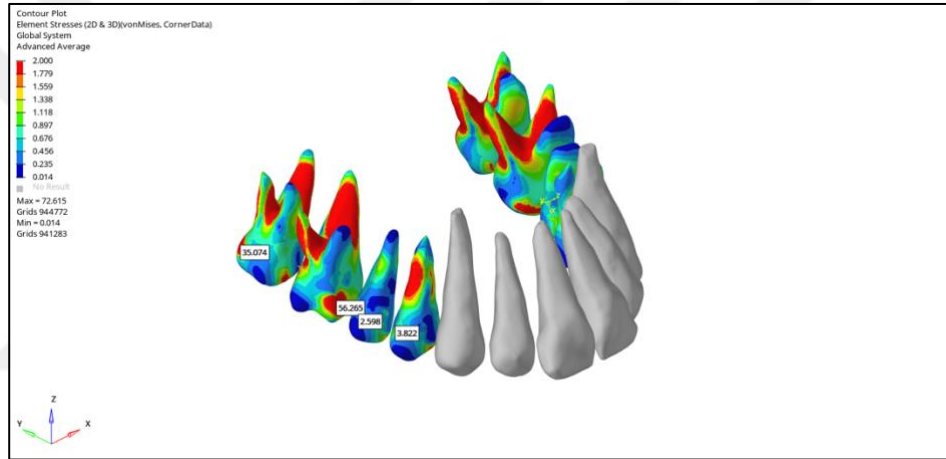


Şekil 4.49: Grup 5'e ait maksimum principal değerleri.

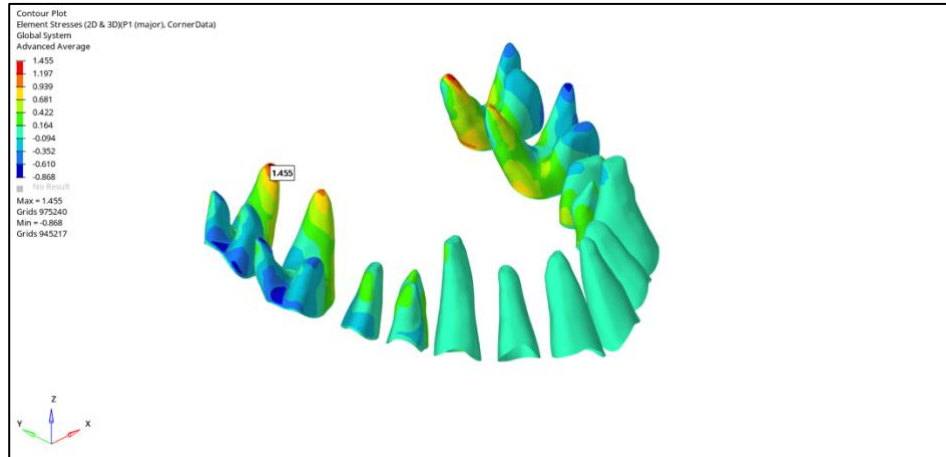


Şekil 4.50: Grup 5'e ait minimum principal değerleri.

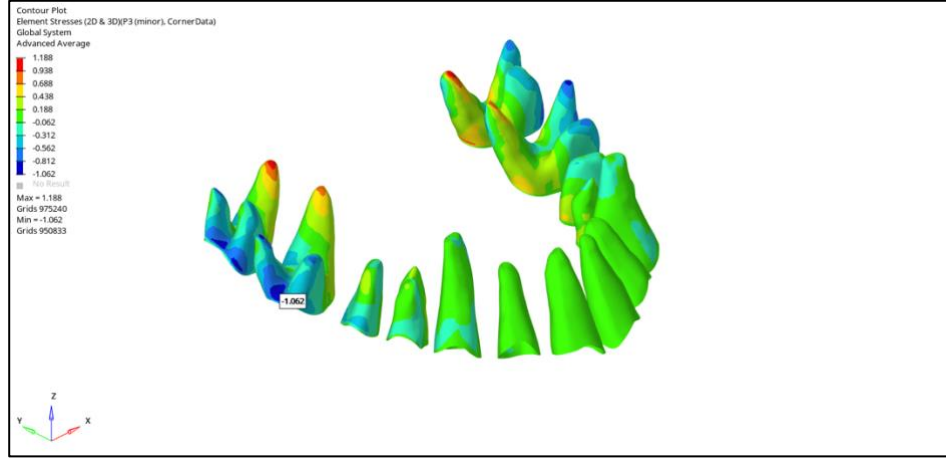
Grup 6:



Şekil 4.51: Grup 6'ya ait Von Mises değerleri.



Şekil 4.52: Grup 6'ya ait maksimum principal değerleri.



Şekil 4.53: Grup 6'ya ait minimum principal değerleri.

5. TARTIŞMA

5.1 Amaç

Son yıllarda şeffaf plaklar ile ortodontik tedavi, hem estetik hem de hasta konforu açısından avantajları nedeniyle hastalar tarafından talep edilen bir tedavi yöntemi haline gelmiştir [179]. Geleneksel tedavilerin estetik limitasyonlarını ortadan kaldırmak ve hasta beklentilerini karşılayabilmek için hasta beğenisine hitap eden sistemlerin gelişimi hızlanmıştır [64, 178].

Güncel bir tedavi protokolü olan şeffaf plaklar ile ortodontik tedavinin klinik başarısı literatürde tartışılmaktadır. Malik ve ark., 1-5 mm çapraşıklığı düzeltmek amacıyla, şeffaf plaklar kullanılarak yapılan ekspansiyonun önerildiğini bildirmiştir [180]. Şeffaf plaklar ile posterior dişlerin ekspansiyonu incelendiğinde, her çeyrek ark için elde edilen genişletme miktarının genellikle 2 mm veya daha düşük miktarlarda öngörülebilir olduğu belirtilmiştir [96].

Dijital simülasyonlarda öngörülen bukkale gövdesel hareket miktarı, klinik olarak gerçekleşen hareketten fazla olup, genellikle devrilme hareketi ile gerçekleşmektedir. Lombardo ve ark., bukkolingual yöndeki tipping hareketinin %42.9 oranında öngörülebilir olduğunu bildirmiştir [108]. Zhou ve Guo, maksiller birinci molar dişlerin bukkal yönde gövdesel hareket etkinliğini %36,35 olarak rapor etmiş ve Invisalign sisteminin posterior dişlerde devrilme hareketi yaparak ark genişliğini artırdığını belirtmiştir [65]. Grünheid ve ark., maksiller posterior dişlerin, sanal tedavi planında öngörülenden daha lingualde konumlandığını ve fasiyal yönde artmış kron torku gösterdiği bildirilmiştir. Artmış kuron torkunun, maksiller ark ekspansiyonunun tam olarak gerçekleşmemesi ve molar dişlerin gövdesel hareket yerine devrilme ile yer değiştirmesi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir [185]. Bu durum, Invisalign ile gerçekleştirilen maksiller genişletme tedavilerinde ortalama başarı oranının %72 olduğu ve sanal planlanandan daha fazla devrilme hareketi meydana geldiğini bildiren güncel bir çalışmanın bulgularıyla uyumludur [186]. Ancak, literatürde tipping hareketi sırasında kökün hangi yöne gittiği ile ilgili yeterli bilgi bulunmamaktadır. Çalışmamızda tedavi sonuçlarının daha stabil olmasını sağlayabilmek amacıyla, şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon sırasında, molar dişlerin kök hareket miktarlarının da değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Birçok çalışma şeffaf plaklarla ark ekspansiyonu

yapılabildiğini doğrulamıştır ancak, verimliliği planlanan değerin altında kalmıştır [181]. Bu nedenle, çalışmamızda şeffaf plakların ekspansiyon etkinliği ve gerçekleştirilen hareket tipinin değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Ayrıca şeffaf plaklarla ekspansiyon sırasında, kuronun bukkal yönde hareketine bağlı olarak; dişeti çekilmesi, kemik dehissensini içeren periodontal hasar riskinde artış meydana gelmektedir [182, 183]. Şeffaf plaklar ile posterior bölgedeki dişlere tork uygulamak biyomekanik olarak zor bir harekettir. Sabit ortodontik tedavide rijit teller ile yüksek momentler oluşturularak etkin tork sağlanabilirken, şeffaf plakların esnek malzemesi ve çıkarılabilir yapısı benzer kuvvet çiftlerini oluşturmayı güçleştirmektedir [148]. Bu nedenle, çalışmamızda kuvvet çifti oluşturmaya yönelik alternatif senaryolar belirlenerek, molar dişlerde ekspansiyon sırasında uygun momenti oluşturacak ataşman konfigürasyonunun belirlenmesi hedeflenmiştir.

Molar dişlerin kök yüzey alanının daha geniş olması nedeniyle, bu dişlerde tork hareketinin gerçekleştirilebilmesi için diğer dişlere oranla daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır [184]. Grünheid ve ark. gerçekleştirdiği retrospektif analizde, şeffaf plaklar ile planlanan diş hareketlerinin gerçekleştirilme düzeyi incelenmiş ve en belirgin farkın maksiller ikinci molar dişlerdeki tork hareketinde ortaya çıktığını rapor etmiştir. Bu durum, şeffaf plakların distal bölgelerinde artan esneklik nedeniyle kuvvet iletiminde azalma ve buna bağlı olarak tork hareketinin sistemin planladığı gibi gerçekleşmemesine bağlanmaktadır [185]. Bu nedenle, çalışmamızda farklı yüzeylere farklı kombinasyonlarla ataşman eklenerek plak deformasyonunun da değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Knop ve ark., bitim kriterlerine göre sabit aparey ve şeffaf plaklarla tedavi edilen hastaları karşılaştırdıkları sistematik bir derlemede; sabit ortodontik tedavinin okluzal kontakları oluşturmada, tork kontrolünde ve transversal genişliği arttırmada şeffaf plaklardan daha üstün olduğunu rapor etmiştir [187]. Ancak, literatürde bu sistemlerin gövdesel hareketten ziyade daha fazla dental devrilmeye neden olduğuna dair bulgular da mevcuttur. Çalışmamızda, hareketler X-Y-Z düzleminde ayrı ayrı incelenelerek, farklı senaryolarda gerçekleşen kök ve kron hareketleri için optimum yöntemin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bununla birlikte, ortognatik cerrahi vakalarında kesici ve molar torkunun optimal değerlerde düzenlenmesi gerekmektedir. Tork değerleri ideal değerlere getirilmeden

cerrahi operasyon gerçekleştirildiğinde, prematür temaslara bağlı olarak tedavi, openbite gibi malokluzyonların relapsı ile sonuçlanabilmektedir. Ayrıca, premolar ve molar dişlerin tork değerleri düzenlenmeden cerrahi operasyonun gerçekleştirilmesi, planlanan ark genişliğinde yetersizliğe neden olabilmektedir. Çünkü molar ve premolar dişlerin açılarının ortodontik olarak düzeltimi, genellikle maksiller bukkal tüberkülün bir miktar palatinal hareketini içermektedir [189]. Bu nedenle çalışmamızda, X eksenindeki hareket miktarına göre, Z ekseninde gerçekleşen ekstrüzyon miktarlarının da karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Align Technology, tedavi gören hastaların yaklaşık %30'unun ara düzeltme veya tedavi sonu iyileştirme aşamalarına ihtiyaç duyabileceğini belirtmektedir. Ancak literatürdeki bazı çalışmalar bu oranın %80'e kadar çıkabildiğini bildirmektedir. Bu durum, şeffaf plak sistemlerinin klinik etkinliğine yönelik tartışmaları sürdürmekte ve tedavi planlamasında dikkatli değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir [98]. Çalışmamızda daha öngörülebilir tedavi planlamaları yapılarak, tedavi sonu iyileştirmelerinin ve toplam tedavi süresinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Şeffaf plak sistemleri, üst çene genişletmesini dijital olarak planlama imkanı sunarak, posterior dişlerde daha az bukkal devrilme ve daha fazla gövdesel hareket sağlamayı amaçlamaktadır [95]. Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, Kaliforniya) firması G8 protokolü ile ortodontik tedavi etkinliğini ve öngörülebilirliği artırmak amacıyla geliştirilmiş yenilikler sunmaktadır. Yeni geliştirilen posterior ataşmanlarla, posterior ark ekspansiyonunu desteklemeyi ve bukkal kök torku aktivasyonları ile diş hareketlerinin daha kontrollü olmasını sağlamayı amaçlamıştır [98].

Literatürdeki çalışmalarda, şeffaf plaklarla gerçekleştirilen posterior dişlerin ekspansiyonunun etkinliği ile ilgili fikir birliği bulunmamaktadır. Bu uzmanlık tez çalışmasının amacı, şeffaf plaklarla posterior dişsel ekspansiyon uygulanan hastalarda, molar dişlerde en az yan etkiye neden olan optimum yöntemi belirleyerek, tedavi planlamalarının daha öngörülebilir hale getirilmesini sağlamaktır. Yedi farklı dişsel genişletme senaryosunun dişlerde ve periodontal ligamentte oluşturduğu stres dağılımı ile dişlerdeki yer değiştirme miktarı sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilerek, klinik uygulamalarda daha etkili tedavi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanması planlanmaktadır.

5.2 Materyal Metod

5.2.1 Analiz modelinin oluşturulması

Çalışmamızda analiz modellerinin oluşturulması amacıyla, dahil edilme kriterlerine uygun dental ekspansiyon ihtiyacı olan erişkin hastanın ataşmanlar yerleştirilmeden önceki BT verileri kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık geometrideki yapıların dış kuvvetler etkisinde maruz kaldığı stres ve deformasyonları sayısal olarak simüle etmek amacıyla kullanılan matematiksel bir yöntemdir. İntraoral dokuların üç boyutlu biyomekanik özelliklerini gerçekçi şekilde değerlendirmeyi sağladığı için ortodontik araştırmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar analizi, dokuların fizyolojik yanıtlarını invaziv olmayan ve yüksek duyarlılıkla nicel olarak incelemeyi sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde ortodontik tedavi sürecinde uygulanan kuvvetlerin sağladığı diş hareketleri ve periodontal stres dağılımı analiz edilebilmektedir [190]. Çalışmamızda, sonlu elemanlar analizinden elde edilen veriler ile klinik uygulamalarda etkili ve bilimsel temele dayalı öngörü oluşturmak amaçlanmaktadır. Daha öngörülebilir tedavi planları sayesinde hasta ve hekim konforunun artırılacağı düşünülmektedir.

5.2.2 Grupların oluşturulması

Çalışmamızda şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon gerçekleştirilecek vakalarda üst molar dişlerin ekspansiyon ve tork etkinliği kontrol grubu ve altı çalışma grubu olmak üzere toplam yedi grupta incelenmiştir.

Kontrol grubunda, herhangi bir ataşman ve ek mekanik kullanılmadan sadece aktif plak kuvveti uygulanmıştır. Bu sayede ataşman konfigürasyonlarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Dasy ve ark., ataşman kullanılmasının, şeffaf plağın tutuculuğunu artırarak ve kuvvetin daha iyi iletilmesini sağlayarak, kompleks hareketlerin gerçekleşmesine yardımcı olduğunu belirtmektedir [176]. Invisalign® G8 protokolü ile standardizasyonu sağlayabilmek amacıyla çalışma gruplarında birinci premolar, ikinci premolar ve birinci molar dişlere ataşman yerleştirilmiştir. Ataşmanlar diş kuronlarının meziodistal ve okluzogingival olarak orta üçlüsüne yerleştirilmiştir.

Molar dişlerde bukkolingual olarak kök kontrolü sağlamak ve bukkal kök torku oluşturulmasına yardımcı olmak amacıyla horizontal dikdörtgen ataşmanların eklenmesi önerilmektedir [96]. Bu nedenle, Grup 1’de sadece bukkal yüzeyde horizontal dikdörtgen ataşmanlar yerleştirilerek aktif plak kuvveti uygulanmıştır.

Karras ve ark., klinisyenlerin horizontal dikdörtgen ataşmanları eğimlendirerek, gerçekleşmesi planlanan diş hareketi için gereken kuvvet vektörüne dik bir yüzey alanı sağladığını bildirmiştir [149]. Bu nedenle, Grup 2’de bukkal kök torkunun kuvvet vektörüne uygun olacak şekilde sadece bukkal yüzeye gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşmanlar yerleştirilmiştir.

Invisalign® G8 protokolünün değerlendirilmesi amacıyla Grup3’te sadece bukkal yüzeye optimize ekspansiyon destek ataşmanları yerleştirilmiştir.

Ekspansiyon hareketinin klinik etkinliğini değerlendiren bir sistematik çalışmada ek ataşman ve yeni ataşman tasarımlarının kullanılmasının maksiller posterior dişlerin ekspansiyonun daha etkili olabileceği bildirilmiştir [191]. Ayrıca Dasy ve ark., ellipsoid ataşmanların retansiyon üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı ancak eğimli ataşmanların retansiyonu önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir [176]. Literatürde posterior dişlerin lingual yüzeylerine ataşman yerleştirmenin veya çapraz elastikler ile desteklemenin posterior dişlerdeki çapraz kapanışı düzeltilmesini destekleyebileceği düşünülmektedir [192]. Bu nedenle Grup 4’te bukkal yüzeydeki optimize ekspansiyon destek ataşmanlarına ek olarak, birinci molar dişin palatinal yüzeyine okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir. Palatinaldeki ataşman yüzey eğiminin diş hareketindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla, Grup 5’te herhangi bir eğim içermeyen horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir.

Ahmed ve ark. şeffaf plaklar ile keser retraksiyonunu sonlu elemanlar analizi ile değerlendirdikleri çalışmada, palatinal ataşman yerleştirdikleri grupta maksimum diş hareketi rapor edilmiştir [193]. Sadece palatinalde bulunan ataşmanın molar dişlerdeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla Grup 6’da, bukkale ataşman yerleştirmeden, sadece palatinal yüzeye horizontal dikdörtgen ataşman yerleştirilmiştir.

5.2.3 Ataşman boyutları

Literatürde optimize ekspansiyon destek ataşmanının boyutları hakkında net bir bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmamızda, tedavi planında optimize ekspansiyon

destek ataşmanı bulunan bir hastanın ataşman yerleştirme seansında alınan 3D intraoral dijital kayıtları kullanılmıştır. Wheeler, hareket gerçekleştirilecek dişlere büyük ataşman yerleştirilmesinin dişlerdeki devrilmeyi engellemeye yardımcı olabileceğini belirtmiştir. [192]. Bu nedenle çalışmamızda, küçük boyutlara sahip optimize ataşmanların, daha büyük boyularda olan dikdörtgen ataşmanlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Üretici firma verileri doğrultusunda, horizontal dikdörtgen ataşmanlar 1x2x3 mm (kalınlık: 1mm, genişlik: 2 mm, uzunluk: 3 mm), 1x2x4 mm ya da 1x2x5 mm olabilmektedir. Gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşmanlar sagittal düzlemde gingival kısımda 0.5 mm kalınlığında, okluzale yakın kısımda ise 1.25 mm kalınlıktadır. Okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşmanlar ise sagittal düzlemde okluzal kısımda 0.5 mm kalınlığında, gingivale yakın kısımda ise 1.25 mm kalınlıktadır [176]. Literatürde molar dişlerin bukkal kök torkunun değerlendirildiği bir çalışmayı referans alarak, ataşman boyutları 1x2x3 mm (kalınlık 1mm, genişlik: 2 mm, uzunluk: 3 mm) olarak belirlenmiştir [194].

5.2.4 Şeffaf plak kalınlığı ve gingival sınırları

Şeffaf plakların diş eti hizasında sonlandığı kesi hattı genellikle “trimline” olarak adlandırılmaktadır. Kesi hattı hem plağın retansiyonunda hem de şeffaf plağın biyomekanik etkilerinde değişikliklere neden olabilmektedir. Kesi hattı düz bir şekilde olabileceği gibi, dişlerin kollelerini takip eden scalloped formda da tasarlanabilmektedir. Son dönemde yapılan çalışmalar kesi hattının diş hareketinin başarısını etkileyebilecek bir unsur olabileceğini göstermektedir. Farklı firmalar tarafından üretilen, dişeti hizasının üzerinde, düz kenarlı kesim hattının yüksek retansiyon sağladığı iddia edilmektedir. Literatürde, düz ve uzatılmış kesi hattına sahip olan plakların intrüzyon, translasyon, devrilme ve tork gibi hareketlerde avantaj sağladığı belirtilmektedir [195]. Şeffaf plak üreticileri ve uygulayıcıları, daha kalın materyal, ataşman ve diş eti sınırını uzatarak şeffaf plakların retansiyonunu artırmaya çalışmaktadır [176]. Ancak literatürde bu değişkenlerin optimum retansiyon yöntemi olarak belirlenebileceği bir kanıt bulunmamaktadır.

Invisalign® sisteminde scalloped gingival sınır tasarımı kullanılmaktadır [176]. Bu çalışmada, Invisalign® sistemine ait G8 protokolünde önerilen optimize

ekspansiyon destek ataşmanları kullanıldığı için, scalloped kenar tasarımı tercih edilmiştir.

Şeffaf plakların kullanımı sırasında hastaların rahat takıp çıkarabilmesi için esnekliğe ihtiyaç vardır. Ancak şeffaf plaklar, ortodontik diş hareketini gerçekleştirecek olan gerekli kuvveti uygulayabilmek için belirli bir sertlikte olmalıdır [176]. Literatürde ideal şeffaf plak kalınlığı ile ilgili fikir birliği bulunmamaktadır ve plak kalınlıkları 0.5 – 0.75 mm arasında değişiklik göstermektedir [190]. Şeffaf plak kalınlığının artmasıyla dişlerin yer değiştirme miktarları ve PDL'deki stres değeri artmaktadır. Bunun sonucunda artan ortodontik kuvvetin etkisiyle genişleme verimliliğinin artabileceği ancak buna bağlı olarak periodontal dokulardaki stresin de artacağı belirtilmektedir [190, 196]. Ayrıca plak kalınlığının ekspansiyon sırasında dişlerin bukkolingual yönde kuron ve kök hareket miktarlarının oranında önemli bir değişikliğe neden olmadığı da belirtilmektedir [190]. Dasy ve ark., çalışmalarında şeffaf plak materyalinin malzeme kalınlığından çok malzeme bileşeninin retansiyonda etkili olduğunu rapor etmiştir [176].

Mantovani ve ark., ısıl şekillendirme sonrası şeffaf plak kalınlık dağılımının kesici diş bölgesinde 0,0582-0,639 mm, kanin bölgesinde 0,569-0,644 mm ve molar bölgesinde 0,566-0,634 mm aralığında değiştiği rapor etmiştir. Aynı çalışmada molar bölgede gingival lingual kenar kalınlığının okluzal bölgeye göre önemli düzeyde daha ince olduğu belirtilmiştir. Bu durum klinik olarak molar bölgede diş hareketlerinin daha az öngörülebilir olmasıyla ilişkilendirilmiştir [127]. Çalışmamızda, plağın farklı bölgelerinden ölçümler gerçekleştirerek, molar bölgede 0.5-0.6 mm kalınlık tespit eden Mantovani ve ark.'nın çalışması referans alınarak, plak kalınlığı 0.6 mm olarak belirlenmiştir.

5.2.5 Plak aktivasyon miktarı

Invisalign® firmasına ait şeffaf plağın 14 günde 0.25-0.33 mm diş hareketi sağlayabileceği belirtilmektedir [65]. Ancak Clements ve ark, transversal düzeltim sırasında posterior dişlerin en az hareket kontrolüne sahip olduğu rapor etmiştir[197]. Bu çalışmada tork kompanzasyonu için kullanılan değerler, 0.2 mm plak aktivasyonu temel alınarak gerçekleştirilen referans çalışmadan elde edilen bulgulara göre belirlenmiştir [108]. Bu nedenle, çalışmamızda her plakta 0.2 mm aktivasyon protokolü tercih edilmiştir.

Şeffaf plaklar genellikle, ağıza takıldığında deforme olarak dişlere ve periodontal dokulara kuvvet iletimi gerçekleştiren termaform plastik polimerlerden üretilmektedir[190]. Bu nedenle çalışmamızda, şeffaf plağın kuvvet iletime mekanizmasını temsil edebilmek amacıyla, literatürde belirtilen “ters yönlü yükleme” yöntemi uygulanmıştır [177]. Bu yöntemde, dişler 0.2 mm palatinal yönde hareket ettirildiğinde şeffaf plak geometrisinde gerçekleşen deformasyon hesaplanmış ve deformasyona bağlı oluşan temas kuvvetleri ilgili diş yüzeylerine ters yönde uygulanmıştır (Şekil 3.13). Bu sayede, şeffaf plağın biyomekanik etkilerinin doğru şekilde yansıtılması ve klinik ortamla uyumlu sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Posterior ekspansiyon sırasında dişin bukkal devrilmesini en aza indirmek amacıyla Invisalign® G8 protokolünde, premolar ve birinci molar dişlere otomatik olarak bukkal kök torku uygulanmaktadır[98]. Literatürde G8 protokolünde uygulanan otomatik bukkal kök torkunun miktarı hakkında bir bilgi bulunmamaktadır.

Zou ve Guo, üst birinci molar dişinin kuron ve kök arasındaki ekspansiyon hareketi oranını 2:5 olduğunu belirterek, dişlerin başlangıç torkuna ve hedeflenen ekspansiyon miktarına göre planlama sırasında molar dişlere ilave bukkal kök torku eklenmesini önermektedir [65].

Lione ve ark., şeffaf plaklarla ekspansiyon sırasında diş hareketlerini değerlendirdikleri çalışmada, üst premolar ve molar dişlere 10° ek bukkal kök torku planlandığında, minimum bukkal devrilme ile ark ekspansiyonu sağlanabileceğini belirtmektedir[95].

Ma ve Wang, posterior dişlerin bukkal kök torkunun önceden ayarlanması ve aşırı düzeltim yapılmasının genişleme verimliliğini artırabileceğini öne sürmektedir. [198]. Zhang ve ark. 2023 yılında yayımlanan çalışmada, 0.2 mm’lik gövdesel hareketle genişleme elde edebilmek amacıyla; birinci molar için 1.6°, birinci premolar için 2.35°, ikinci premolar için 2.15°’lik tork kompanzasyonu uygulanması önerilmiştir. Daha yüksek değerlerde tork eklenmesi durumunda, kuronun palatinal devrilerek ekspansiyon etkinliğinin azaldığı belirtilmiştir[178]. Literatürde, bukkal kök torkuna yönelik kompanzasyon değerleri genellikle planlanan toplam diş hareketine göre tanımlanmaktadır. Ancak çalışmamızda bir şeffaf plaktaki kuvvet ve hareket değerleri incelenecektir. Bu nedenle Zhang ve ark.’nın verileri doğrultusunda, birinci premolara

2.35°, ikinci premolara 2.15° ve birinci molara 1.6° ekstra bukkal kök torku değerleri sisteme eklenmiştir.

5.3 Bulgular

5.3.1 Yer değiştirme

X Ekseni:

(Posterior dişler için X eksenini bukkal-lingual yönü ifade etmektedir. “-“ değerler bukkal, “+” değerler palatinal hareketi göstermektedir.)

Houle ve ark., şeffaf plaklar ile gövdesel hareketin mümkün olmadığını ve şeffaf plaklarla ekspansiyon sırasında dişlerin bukkal devrilme gerçekleştirdiğini rapor etmiştir [200].

Galluccio ve ark., Invisalign® ataşmanları dışında ek mekanik kullanılmadan maksiller arkın transversal genişlemesini değerlendirdikleri çalışmalarında, molar dişlerde diş eti seviyesinde %50, tüberkül tepesi seviyesinde % 70 etkinlik bildirmiştir [199]. Ayrıca Houle ve ark., maksiller arkta transversal genişlemenin tüberkül tepelerinde %82.9, gingival seviyede %62.7 ve genel olarak %72.8 oranında olduğunu rapor etmiştir [200].

Literatürde, interdijitasyonun sağlanması ve posterior dişlerin bukkolingual eğimlerinin kontrolü açısından sabit ortodontik apaceylere kıyasla daha az başarılı olduğu belirten çalışmalar mevcuttur [128]. Literatürle uyumlu olarak, çalışmamızdaki tüm gruplarda molar ve premolar dişlerde kuron bukkale, kök palatinal hareket edecek şekilde bukkal devrilme gözlemlenmiştir. Kuronların bukkal hareketi değerlendirildiğinde, en fazla bukkale kuron hareketi ikinci molar dişte görülmektedir. Fakat literatürde, ekspansiyon etkinliğinin anterior bölgeden, posterior bölgeye doğru azaldığı belirtilmektedir [65, 190, 198, 200]. Farklı diş bölgelerinde ekspansiyon verimliliğindeki farklılıklar; kök anatomisi, klinik kuron boyu, kortikal kemik kalınlığı ve yumuşak doku basıncı gibi faktörlerle birlikte şeffaf plak tarafından iletilen bukkal yöndeki kuvvetin kademeli olarak azalması ile ilişkilendirilmektedir [201]. Zhang ve ark. ve Haouili ve ark., şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon sırasında ikinci molarlar üzerinde nadiren ekspansiyon hareketi gerçekleştiğini ve bu durumun şeffaf plakların terminal dişlerde kuvvet uygulayabilme kabiliyetinin sınırlı olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir [178, 201]. Zhang ve ark., posterior dişlerin bukkal devrilmesini

kontrol etmek amacıyla eklenen tork kompanzasyonlarının genişleme hareketinin verimliliğini azalttığı ifade edilmektedir [178]. Çalışmamızın bulguları doğrultusunda, arkın en distalinde yer alan ikinci molar dişin ekspansiyon etkinliğinin daha fazla olması, diğer dişlere tork kompanzasyonu uygulanmasına karşın ikinci molar dişe uygulanmaması olabilir. Benzer şekilde, molar dişlerin kökleri arasında en fazla palatine yer değiştirme ikinci molar dişin bukkal köklerinde gözlemlenmesi, bu dişte devrilme hareketinin en belirgin şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu bulgu, Grünheid ve ark. tarafından şeffaf plaklar ile maksiller ekspansiyon sırasında uygun genişletme miktarı ve tork değerlerini değerlendirdikleri çalışmada, üst ikinci molar dişte artmış kuron torku tespit edilmesiyle uyumludur [185]. Ayrıca çalışmamızda, kuvvetin sadece molar dişlere uygulanması ve premolar dişler üzerine doğrudan kuvvet uygulanmamasının, molar dişlerde daha yüksek genişleme miktarı elde edilmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Birinci molar dişin meziobukkal ve meziopalatinal tüberkülleri referans alınarak ekspansiyon miktarı değerlendirildiğinde, en yüksekten en düşüğe sıralaması; Grup 4> Grup 5> Grup 3> Grup 2> Grup1> Grup6 = Kontrol Grubu olarak tespit edilmiştir. Birinci molar dişin meziobukkal ve meziopalatinal kök apeksleri referans alınarak kök hareket miktarı incelendiğinde, en yüksekten en düşüğe sıralaması; Grup 1 = Grup 2 = Grup 5> Grup 3> Kontrol Grubu = Grup 4 = Grup 6 şeklinde tespit edilmiştir. Bulgulara göre, kuronun bukkale hareketinin en az gerçekleştiği gruplar, ataşman içermeyen kontrol grubu ve sadece palatinal yüzeyde ataşman bulunan Grup 6 olarak belirlenmiştir. Bu bulgu tek plak aktivasyonu sırasında ekspansiyon etkinliğinin en az, ataşmanın olmadığı veya sadece palatinal yüzeyde ataşman olduğu durumlarda gerçekleşeceğini göstermektedir. Ayrıca sadece ataşmana bağlı olarak bir tedavi planı oluşturmanın mümkün olmadığını ve ataşman ölçülerine ek olarak yerleştirildiği diş yüzeyinin de hareket miktarını etkilediğini göstermektedir.

Invisalign® G8 protokolünün devreye girebilmesi için en az 0.5 mm bukkal genişletme eşiği gerekmektedir [98]. Bu nedenle, elde edilen bulguların tek plak aktivasyonuna göre değil, ekspansiyon etkinliğine göre değerlendirilmesi, klinik açıdan daha faydaları sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

Daha öngörülebilir tedaviler için, tedavi planlamalarında aşırı düzeltim planlanmasının gerekli olduğunu bildirmektedir [198]. Fakat bukkal yöndeki aşırı düzeltimin, köklerdeki hareket miktarına etkisini inceleyen yeterli sayıda çalışma

bulunmamaktadır. Plak sayısı ve aktivasyon miktarı artırılrsa bile elde edilen hareketin devrilme veya kontrollü devrilme olması tedavi etkinliğini değiştirecektir. Çalışmamızda, kuronun ekspansiyon etkinliğine kıyasla, kök apeksinin en fazla palatine hareket ettiği gruplar, Grup 6 ve kontrol grubu olarak tespit edilmiştir. Rossini ve ark., yaptıkları sistematik literatür incelemesinde şeffaf plakların, posterior bukkal devrilmeyi kontrol etmede etkili olduğunu belirtmektedir [106]. Çalışmamızın bulgularına göre, kuronun palatinal yönde eğimli olduğu, negatif kuron torkuna sahip vakalarda ekspansiyon hareketinin devrilme şeklinde uygulanması hedefleniyorsa, ataşman kullanılmaması veya yalnızca palatinal yüzeye yerleştirilen ataşmanlar ile tutuculuğun artırılması klinik olarak önerilebilir.

Birinci molar dişin kuron ekspansiyon etkinliğine göre kökün palatine hareket miktarı değerlendirildiğinde, en az palatinal yönde kök hareketi gerçekleştiren gruplar sırasıyla, Grup 4> Grup 5>Grup 3>Grup 2> Grup 1>Grup 6=Kontrol Grubu olarak bulunmuştur.

Literatürde optimize ekspansiyon destek ataşmanının etkinliğini değerlendiren bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmamızın bulguları doğrultusunda, bukkal yüzeye optimize ekspansiyon ataşmanı yerleştirilen gruplarda, ekspansiyon etkinliğine kıyasla palatinal yönde en az kök hareketi gerçekleşmiştir. Bu bulgu, şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon sırasında konvansiyonel ataşmanlara göre G8 protokolünde kullanılan optimize ekspansiyon destek ataşmanının, boyutları daha küçük olmasına rağmen, klinik olarak daha etkili olduğunu göstermiştir. Thilagalavani ve ark. ise çekim boşluğuna komşu dişlerin kök eğimlerini değerlendirdikleri çalışmada, optimize ve konvansiyonel ataşmalar arasında fark tespit etmemiştir [202]. Karras ve ark. da bizim bulgularımıza benzer şekilde, optimize ve konvansiyonel ataşmanları rotasyon ve ekstrüzyon hareketi açısından karşılaştırdıkları çalışmada, optimize ataşmanların daha yüksek hareket doğruluğu sağladığını belirtmiş, ancak bu farkın istatistiksel olarak anlamlı düzeyde olmadığını rapor etmiştir [149]. Hassanaly ve ark. ise çalışmamızla uyumlu şekilde, lateral dişlerin rotasyon düzeltiminde optimize ataşmanların daha etkili olduğunu rapor etmiştir [203]. Literatürde, optimize ve konvansiyonel ataşmanların, hareketler üzerindeki etkinlikleri konusunda tam bir görüş birliği bulunmamakla beraber çalışmamızda; ataşman tasarımının, ataşman boyutuna göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmamızda, optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak palatinalde ataşman yerleştirilmesi avantaj sağlamıştır. Literatürde şeffaf plaklarla ekspansiyon sırasında palatinal ataşmanın etkinliğini araştıran bir çalışma bulunmamaktadır. Ekspansiyon etkinliğine göre kökü palatinalde en az hareket eden grup, bukkal yüzeyde optimize ekspansiyon destek ataşmanı, palatinalde okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman olan Grup 4 olmuştur. Bu sonuç, plak retansiyonunun ve kuvvet iletilen yüzey alanının artmasına bağlı olarak gerçekleşmiş olabilir. Çalışmamızda, sadece palatinal yüzeye ataşman yerleştirildiğinde diş hareketine destek olmamasına rağmen bukkal yüzeydeki ataşmanlarla sinerjik bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Fakat bu çıkarımın, ileri klinik araştırmalarla da desteklenmesi gerekmektedir.

Papadimitriou ve ark., şeffaf plaklar ile tedavi planlama aşamasında ataşmanların kullanımının, özellikle yeni ataşman tasarımlarının, maksiller posterior dişlerin ekspansiyon sırasında gövdesel hareket gerçekleştirilmesinde etkili olabileceğini bildirmiştir [204]. Ayrıca, Karşlı ve ark., okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşmanların, maksiller molar dişlerin şeffaf plaklarla ekspansiyonu sırasında oluşan kuronun bukkal devrilme eğilimini azaltmada etkili olduğunu bildirmiştir [194]. Şeffaf plaklarla premolar rotasyonunun düzeltilmesini karşılaştıran bir çalışmada, hem bukkal hem de lingual yüzeylere yerleştirilen ataşmanların, yalnızca tek yüzeyde uygulanan ataşmanlara kıyasla rotasyon kontrolünde daha etkili olduğu rapor edilmiştir [205]. Literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak çalışmamızda, bukkal yüzeyde horizontal dikdörtgen ataşman kullanılan gruplarda, ataşmana gingival eğim verilmesi, kökün palatinalde hareket miktarını azaltmıştır. Bu duruma, plak tutucunun artmasına bağlı olarak, plak etkinliğinin artmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bukkal yüzeydeki ataşmanlarda olduğu gibi, palatinal yüzeyde bulunan ataşmanlarının yüzeyinin eğimlendirmesinin biyomekanik olarak avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Premolar dişlerde en yüksek ekspansiyon miktarı, molar dişlere benzer şekilde, optimize ekspansiyon destek ataşmanı kullanılan grupta elde edilmiştir. Horizontal dikdörtgen ataşman kullanılan gruplar arasında ise, gingival eğimli ataşman kullanılan grupta ekspansiyon miktarı daha yüksek görülmüştür. Ekspansiyon etkinliğine göre kökün palatinalde hareket miktarları değerlendirildiğinde ise, en az palatinal yönde kök hareketi gerçekleştiren bukkal ataşman türleri sırasıyla, optimize ekspansiyon destek ataşmanı, gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman ve horizontal dikdörtgen

ataşman olarak saptanmıştır. Premolar dişlere aktif kuvvet uygulanmamasına rağmen, şeffaf plakların kapalı sistem olması nedeniyle premolar dişlerde de hareket gözlemlenmiştir. Premolar dişlerde de ekspansiyon yönünde hareket görülmesi, premolar bölgedeki plak deformasyonu miktarlarıyla uyumludur. Bu bulgu, şeffaf plaklar ile gerçekleştirilen diş hareketlerinin karşılayıcı kuvvetlerinin, komplike sonuçlara neden olabileceğini göstermektedir. Çalışmamızın sonuçları, tedavi planlaması yapılırken diş hareketlerinin yalnızca tek ekseninde veya tek bir dişle sınırlı düşünülmemesi ve çevre dişler üzerindeki olası etkilerin de göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bukkal yüzeyinde optimize ekspansiyon destek ataşmanı kullanılan gruplarda, birinci molar dişin palatinal yüzeyine eklenen ataşmanın; premolar dişlerin kuronlarının bukkal yöndeki hareket miktarını artırdığı, buna karşın köklerin palatinal yöndeki hareket miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Literatürde birinci molar dişlere ataşman eklenmesinin, premolar dişlerde oluşturabileceği etkilere yönelik bir bilgi bulunmamaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, premolar dişlerdeki ekspansiyon etkinliğini artırmak ve devrilme eğilimini azaltmak amacıyla birinci molar dişlerin palatinal yüzeyine ataşman eklenmesinin klinik açıdan faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Y Eksen:

(Posterior dişler için Y eksen mezio-distal yönü ifade etmektedir. “-“ değerler meziale, “+” değerler distale hareketi göstermektedir.)

Çalışmamızdaki tüm gruplarda, birinci premoların palatinal tüberkülü hariç kuronlarında mezial hareket saptanmıştır. Birinci premoların palatinal tüberkülünde ise distale hareket gözlemlenmiştir. Tüm bukkal köklerde mezial hareket, palatinal köklerde distal hareket gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, tork uygulamaları ve ataşman konfigürasyonlarının şeffaf plaklarla gerçekleştirilen ekspansiyon üzerindeki etkilerini değerlendiren Karşı ve ark.nın bulgularıyla paralellik göstermektedir [194]. Y eksenindeki yer değiştirme miktarları incelendiğinde, şeffaf plakların ekspansiyon sırasında kapalı sistem özellikleri nedeniyle parabolik ark formundan, düz forma geçme eğilimi gösterdiği ve buna bağlı olarak artan bukkal hareketin etkisiyle posterior dişlerde mezial yönde hareket meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca literatürde, şeffaf plaklar ile gerçekleştirilen ekspansiyon sırasında ClinCheck yazılımında kesici dişlerde retraksiyon hareketi öngörülmesine bile, kesici dişlerin retraksiyon eğilimi gösterdiği bildirilmektedir [105]. Çalışmamızda sınır koşulu olarak anterior dişlerin hareketi engellenmiştir. Bu durumun etkisinin posterior bölgede mezializasyon şeklinde yansımış olabileceği düşünülmektedir.

Z Eksen:

(Posterior dişler için Z eksen okluzo-gingival yönü ifade etmektedir. “-“ değerler ekstrüzyon, “+” değerler intrüzyon hareketini göstermektedir.)

Çalışmamızda tüm gruplarda, bukkal tüberkül tepelerinde ve bukkal kök apekslerinde intrüzyon gözlemlenirken, palatinal tüberkül tepelerinde ve palatinal kök apekslerinde ekstrüzyon gözlemlenmiştir. Dişlerin devrilme hareketi ile ekspansiyon olması nedeniyle dişlerde ekstrüzyon gözlenmesi çalışmamızda beklenen bir bulgudur. Tüm gruplarda en fazla ekstrüzyon, birinci molar dişin meziopalatinal tüberkül tepesinde saptanmıştır.

Birinci moların palatinal tüberkülünde, optimize ekspansiyon destek ataşmanına ek olarak palatinal yüzeyine ataşman yerleştirilen Grup 4 ve Grup 5’te en yüksek ekstrüzyon değeri gözlemlenmiştir. Her iki grubun ekspansiyon değerleri aynı olmasına rağmen, ekspansiyon etkinliklerine göre değerlendirildiklerinde palatinal yüzeye yerleştirilen okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşmanın daha az ekstrüzyona neden olarak, vertikal boyutları artmış hastalarda daha avantajlı olabilir. Ataşmanın okluzal bölgede daha geniş bir yüzey alanına sahip olması, intrüzyon kuvvetlerinin etkisini artırarak ekstrüzyonun daha kontrollü gerçekleşmesine katkı sağlamış olabilir.

Bukkal yüzeye yerleştirilen ataşman türleri arasında ekstrüzyon miktarı açısından bir fark bulunmamıştır. Bununla birlikte, ekstrüzyon miktarı ekspansiyon etkinlikleriyle karşılaştırıldığında sırasıyla optimize ekspansiyon destek ataşmanı, gingival eğimli horizontal dikdörtgen ataşman ve horizontal dikdörtgen ataşman daha az ekstrüzyona neden olmaktadır. Bu durumun, gingival eğimli ataşmanın ve optimize ataşmanın aktif yüzeyinin dişin ekstrüzyonuna neden olacak devrilme momentine ters yönde moment oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışmamızın bulgularını değerlendirerek, vertikal boyutu kritik olan hastalarda optimize ekspansiyon destek ataşmanı tercih edilmesi önerilebilir. Ek olarak, ataşman uygulanmayan kontrol grubu

ve sadece palatinal yüzeye ataşman yerleştirilen Grup 6'da palatinal tüberkülde en düşük ekstrüzyon değerleri elde edilmiştir.

Zhou ve Guo, şeffaf plaklar ile ekspansiyon sırasında genellikle belirgin bir bukkal devrilme olduğu belirtmektedir [65]. Li ve ark., posterior dişlerin bukkal devrilmesi sonucunda palatal tüberküldeki ekstrüzyon erken okluzal temaslara neden olarak çiğneme fonksiyonunun bozulmasına ve temporomandibular eklem rahatsızlıklarına neden olabildiğini vurgulamaktadır [190]. Aynı zamanda palatinal tüberkülün ekstrüzyonu okluzal düzlem açısında ve mandibulada saat yönünde rotasyona neden olarak vertikal büyüme paterni olan hastalarda olumsuz etkilere neden olabilmektedir [190]. Çalışmamızın bulguları doğrultusunda, şeffaf plaklar ile dental ekspansiyon gerçekleştirilirken devrilme hareketinin kaçınılmaz olması nedeniyle oluşacak erken temaslara dikkat edilmesi ve kritik olgularda ek mekaniklerin değerlendirilmesi fayda sağlayacaktır. Arslan ve Tozlu, şeffaf plaklarla tedavi sürecinde baskı alanları oluşturmak amacıyla kullanılan özel penslerin, bitim ve iyileştirme aşamalarındaki klinik etkinliğini değerlendirdikleri çalışmada, uygulanan tork aktivasyonlarının %14.7 oranında başarıyla gerçekleştiğini bildirmiştir [212].

Orta şiddetli ve şiddetli dental çapraşıklıklar ile görülen çapraz kapanış durumlarında, optimize ataşmanlar ve SmartForce plak aktivasyonu ile desteklenen posterior ark ekspansiyonu sayesinde daha kontrollü diş hareketleri elde edileceği iddia edilmiştir. Bu yeni yaklaşımlar aynı zamanda posterior açık kapanış (PAK) oluşma riskini azaltmayı hedeflemektedir [99, 100]. Optimize ataşmanların etkinliğini değerlendirmek istediğimiz çalışmamızda, ekspansiyon etkinliği ile karşılaştırıldığında, bukkal yüzeyinde optimize ekspansiyon destek ataşmanı bulunan çalışma gruplarının vertikal boyutların korunması açısından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Ekspansiyon etkinliğine göre, bukkal yüzeyde ekspansiyon destek ataşmanı bulunan, palatinal yüzeyde okluzal eğimli horizontal dikdörtgen ataşman bulunan Grup 4 en az ekstrüzyona neden olan konfigürasyon olarak değerlendirilmiştir. Diğer gruplar, ekspansiyon etkinliği ve ekstrüzyon miktarına göre şu şekilde sıralanmıştır: Grup 4>Grup 5> Grup 3>Grup 2>Grup 1>Grup 6= Kontrol Grubu. Bulgularımıza göre, açık kapanış riski bulunan hastalarda bukkal yüzeylerde optimize ataşman tercih edilmesi klinik olarak fayda sağlayacaktır.

Elde edilen bulgulara göre, ataşman bulunmayan kontrol grubu ile sadece palatinal yüzeyde ataşman bulunan Grup 6 arasında, ekspansiyon etkinliği ve ekstrüzyon miktarı

açısından bir fark bulunmamıştır. Dolayısıyla, periodontal sağlığı zayıf bireylerde ekspansiyon planlamasında yalnızca palatinal ataşman kullanımından kaçınılması, klinik açıdan uygun bir yaklaşım olabilir.

Total hareket miktarı

Tüm gruplarımızda total hareket miktarı en fazla ikinci molar dişte görülmüştür. Bu bulgu en fazla bukkolingual devrilme göstermesi bulgusuyla uyumludur. Benzer şekilde total hareket miktarı en az birinci premolar dişte gözlemlenmiştir. Gruplar arasında değerlendirdiğimizde ekspansiyon etkinliğine paralel olarak en fazla kuron yer değiştirmesi optimize ekspansiyon destek ataşmanı bulunan gruplarda gözlemlenmiştir.

Şeffaf plak deformasyon miktarı

Şeffaf plağa ait deformasyon miktarında tüm gruplarda en yüksek değer ikinci molar dişin tüberkül tepesi bölgesinde, en düşük değer aktif kuvvet uygulanmayan premolar diş bölgesinde görülmüştür. Plak deformasyonunun molar bölgede en yüksek düzeyde olması, bu bölgeye aktif kuvvet uygulanmasıyla uyumlu bulunmuştur. Ancak bu çalışmanın bir sonlu elemanlar analizi olduğu göz önünde bulundurulduğunda, arkın en distal bölgesinde yer alan diş üzerinde tutarlı sonuçlar verememiş olabileceği dikkate alınmalıdır. Mao ve ark., ekspansiyon sırasında arkın distaline doğru gittikçe şeffaf plakların deformasyonunun arttığı ve bu durumun arkın distalindeki dişlerdeki hareket tutarsızlığı ile ilişkili olabileceği belirtmiştir [206]. Cortano ve ark., şeffaf plağın distal kısmında en fazla deformasyon görülmesinin, şeffaf plağın materyali ve mekanik özellikleri ile ilgili olabileceği vurgulamıştır [7].

Çalışmamızda en düşük değerlerde şeffaf plak deformasyonu, en fazla miktarda diş hareketi gerçekleşen Grup 4'te gözlemlenmiştir. Şeffaf plak deformasyon miktarı sırasıyla, Grup 4<Grup 5<Grup 3< Grup 2<Grup 1<Grup 6<Kontrol grubu şeklinde olup, hareket etkinliği arttıkça plak deformasyon miktarının azalmasıyla uyumludur. Şeffaf plak deformasyonu, tedavi sonuçlarını etkileyen önemli bir faktördür [7]. Wang ve ark. da, şeffaf plak deformasyonunun artmasıyla, diş hareketinin etkinliği ve klinik olarak öngörülebilirliğinin azaldığını belirtmektedir [207]. Çalışmamızda tespit edilen plak deformasyon miktarı; ataşman miktarı arttıkça, plak tutuculuğunun artmasına bağlı olarak plak deformasyonunun azaldığını belirten Fan ve ark.'nın çalışmasıyla uyumludur[208].

5.3.2 Von mises, maximum principal ve minimum principal stres değerleri

Diş ve PDL'ye ait değerler

Çalışmamızda tüm gruplarda en yüksek Von Mises stres değerleri, birinci molar dişin meziobukkal kuron bölgesinde, ikinci molar dişin distobukkal kuron bölgesinde ve molar dişlerin furkasyon bölgelerinde görülmektedir. En düşük değerler ise ikinci premolar dişin kuron bölgesinde görülmektedir. Hareket etkinliğinin daha fazla olduğu ve ataşman bulunan gruplarda, birinci molar diş yüzeyindeki stres miktarı daha yüksek bulunmuştur. Gruplara göre birinci molar dişlerde Von Mises stres değerinin sıralaması hareket miktarına benzer şekilde, Grup 4>Grup 5> Grup 3>Grup 2>Grup 1>Grup 6= Kontrol Grubu olarak tespit edilmiştir. Tüm gruplarda stres düzeyleri, minenin basınç altında güvenli kabul edilen stres değerinin altında kalarak fizyolojik sınırlar içerisinde kalmıştır [209]. Ayrıca, hareket miktarındaki artışa paralel olarak stres seviyelerindeki yükselme, beklenen bir biyomekanik sonuçtur.

Tüm gruplarda, PDL'ye ait en yüksek maksimum principal değerler kırmızı ile ifade edilmiş olup, molar dişlerin palatinal kök apeksleri hizasında gözlemlenmiştir. PDL'ye ait en yüksek minimum principal değerler ise mavi ile ifade edilmiş olup, molar dişlerin furkasyon bölgelerinde gözlemlenmiştir. Gruplar arasında en yüksek maksimum principal ve minimum principal değerleri, hareket miktarının en fazla olduğu Grup 4 'te en yüksek, hareket miktarının en az olduğu kontrol grubunda en düşük bulunmuştur. Hareket miktarının en fazla olduğu gruplarda maksimum ve minimum principal stres değerlerinin bulunması, von mises stres değerleri ile paralellik göstermektedir. Molar dişlerin palatinal kök apekslerinde çekme kuvvetinin, molar dişlerin furkasyon bölgesinde ise baskı kuvvetlerinin yoğunlukta olması, dişin devrilme hareketi göstermesi ile uyumlu bulunmuştur. Bulgularımızla uyumlu olarak, Cheng ve ark., kesici dişler üzerinde uyguladıkları tork kompanzasyonunun etkilerini üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile değerlendirdikleri çalışmalarında, kesici dişlerin PDL stresinin devrilme hareketine uygun olarak apikal ve servikal alanda yoğunlaştığını rapor etmiştir [210].

Limitasyonlar

Literatürde sonlu elemanlar analizi çalışmalarının şeffaf plak kuvvetlerinin sadece başlangıçtaki anlık etkilerinin açıklanabildiği vurgulanmıştır [211]. Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar analizi de bir şeffaf plak tarafından oluşturulan ortodontik

kuvvetin uygulanmasının ilk anında oluşturduğu stres ve yer değiştirme miktarlarını göstermektedir. Klinik uygulamalarda ortodontik diş hareketleri; periodontal ligament, kemik remodelizasyonu ve hastaya özgü anatomik özellikler gibi biyolojik faktörlerden etkilenmektedir [211]. Mevcut  alışma biyolojik süreçleri dahil edemediği için uzun vadeli ortodontik hareket mekanizmasını yansıtamamaktadır.

Çalışmamız bir hastanın bilgisayarlı tomografı verilerinden oluşturulmuş bir model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bir vaka üzerinden gerçekleştirilen analizin sonuçları, farklı hasta anatomileri üzerindeki etkileri değerlendirmekte sınırlı kalmaktadır.

Klinik uygulamalarda diş ve plak arasındaki boşluk, tükürük, çiğneme kuvvetleri gibi birçok faktör şeffaf plakların etkilerini değiştirebilmektedir. Ancak  alışmamızda bu faktörler sisteme dahil edilememiştir [210].

Invisalign® G8 protokolünde tanıtılan optimize ekspansiyon destek ataşmanları ve SmartForce plak aktivasyonu birlikte çalıştığı belirtilmiştir [100]. Literatürde SmartForce plak aktivasyonunun teknik detayları bulunmamaktadır. Bu nedenle  alışmamızda SmartForce plak aktivasyonu uygulanamamıştır.

Optimize ataşmanlar, şeffaf plak ile temas eden aktif bir y zeeye sahiptir. Bu tasarımda, ataşmanın diş üzerindeki boyutu ile şeffaf plak içinde oluşturulan ataşman boşluğunun boyutu birbirinden farklılık göstermektedir [105]. Ancak literatürde bu boşluk miktarının ölçümüne dair bir bilgi bulunmadığından, plak içerisindeki boşluk sonlu elemanlar analizi modeline yansıtılamamıştır.

Bu çalışmada, posterior dişlerin ekspansiyon etkinliğine göre daha az yan etki oluşturan konfigürasyonu tespit etmek amaçlanmıştır. Kesici dişlerin olası etkileşimlerinin değerlendirilmesini proje bütçesi karşılamamıştır ve bu nedenle sistem santral dişin mezial hizasından sabitlenmiştir. Sınır koşulunun kesici dişler hizasında olması nedeniyle kesici dişlerin olası etkileşimleri incelenememiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, şeffaf plaklarla üst molar dişlerde gerçekleştirilen dental ekspansiyon sırasında kullanılan farklı ataşman tasarım ve konumlarının posterior dişlerde oluşturduğu hareket ve stres dağılımları karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Tüm gruplarda kuronlar bukkale, kökler palatine hareket ederek bukkal tipping gerçekleşmiştir. Bu durum şeffaf plaklar ile molar dişlerde ekspansiyon sırasında paralel hareketin sağlanamadığını göstermiştir.
- 2) Optimize ataşmanlar, konvansiyonel ataşmanlara kıyasla daha yüksek düzeyde ekspansiyon etkinliği sağlamıştır.
- 3) Bukkal yüzeye yerleştirilen ataşmana ek olarak palatinal yüzeye ataşman uygulanan gruplarda, ekspansiyon etkinliği artmış; köklerin palatine devrilme eğilimi ise azalmıştır.
- 4) Bukkalde optimize ekspansiyon destek ataşmanı ve palatinalde okluzale eğimli horizontal dikdörtgen ataşman bulunan Grup 4, en fazla ekspansiyon gerçekleşen ve bu genişleme oranına kıyasla en düşük palatinal kök hareketi gerçekleştiren, dolayısıyla paralele en yakın diş hareketi gösteren grup olmuştur.
- 5) Eğimlendirilmiş yüzeye sahip konvansiyonel ataşmanlar, diş hareketi etkinliğini artırmıştır.
- 6) Sadece palatinal yüzeye ataşman uygulanan gruplarda, bukkal ataşman kullanılan gruplara kıyasla daha düşük düzeyde diş hareketi gerçekleşmiştir, ancak ataşman bulunmayan kontrol grubuna kıyasla hareket miktarları arasında anlamlı fark bulunmamıştır. Bu bulgu, ataşman yerleşim yüzeyinin hareket etkinliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.
- 7) Birinci molar dişlerin palatinal yüzeyine ataşman yerleştirilmesi, premolar dişlerdeki ekspansiyon etkinliğini artırmış ve bu dişlerin köklerinin palatine devrilmesini azaltmıştır.
- 8) Tüm gruplarda palatinal tüberküllerde ekstrüzyon tespit edilmiştir.

- 9) En yüksek stres dağılım değerleri, hareket miktarının en fazla gerçekleştiği Grup 4'te gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlara göre;

- Şeffaf plaklarla dental ekspansiyon planlanırken, dişlerin devrilme hareketi ile yer değiştireceği göz önünde bulundurularak, fazla düzeltim veya ek mekanikler ile desteklenmelidir. Paralel kök hareketi ile genişletmeye ihtiyaç duyulan durumlarda, şeffaf plaklar ile ekspansiyon tercih edilmemelidir.
- Daha kontrollü devrilme hareketi ile ekspansiyon hedefleniyorsa, optimize ataşmana ek olarak palatinal yüzeyde oklüzale eğimli horizontal ataşmanların kullanılması önerilmektedir.
- Tek bir yüzeye ataşman yerleştirilecekse, bukkal yüzey tercih edilmelidir.
- Artmış palatinal kuron eğimi gösteren olgularda; ataşman yerleştirilmemesi veya yalnızca palatinal yüzeye ataşman yerleştirilmesi tercih edilebilir.
- Premolar dişlerde ekspansiyon etkinliğinin artırılması amacıyla, birinci molar dişin palatinal yüzeyine ataşman eklenmesi faydalı olabilir.
- Artmış vertikal yüz yüksekliğine sahip bireylerde şeffaf plaklarla ekspansiyon uygulandığında, molar dişlerde gerçekleşebilecek ekstrüzyon hareketi dikkate alınarak tedavi planlaması yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. **Alarashi, M., Franchi, L., Marinelli, A. ve Defraia, E.** (2003). Morphometric analysis of the transverse dentoskeletal features of class II malocclusion in the mixed dentition. *The Angle Orthodontist*, 73(1), 21-25.
2. **De Felipe, N. L. O., Da Silveira, A. C., Viana, G., Kusnoto, B., Smith, B. ve Evans, C. A.** (2008). Relationship between rapid maxillary expansion and nasal cavity size and airway resistance: short-and long-term effects. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 134(3), 370-382.
3. **McNamara, J. A.** (2000). Maxillary transverse deficiency. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 117(5), 567-570.
4. **Rutili, V., Nieri, M., Franceschi, D., Pierleoni, F., Giuntini, V. ve Franchi, L.** (2022). Comparison of rapid versus slow maxillary expansion on patient-reported outcome measures in growing patients: a systematic review and meta-analysis. *Progress in Orthodontics*, 23(1), 47.
5. **Gu, J., Tang, J. S., Skulski, B., Fields Jr, H. W., Beck, F. M., Firestone, A. R.,** (2017). Evaluation of Invisalign treatment effectiveness and efficiency compared with conventional fixed appliances using the Peer Assessment Rating index. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 151(2), 259-266.
6. **Meade, M. J. ve Weir, T.** (2023). Treatment planning protocols with the Invisalign appliance: an exploratory survey. *The Angle Orthodontist*, 93(5), 501.
7. **Cortona, A., Rossini, G., Parrini, S., Deregibus, A. ve Castroflorio, T.** (2020). Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: a finite element study. *The Angle Orthodontist*, 90(2), 247-254.
8. **Ülgen, M.** (2010). Anomaliler, Sefalometri, Etioloji, Büyüme ve Gelişim, Tanı İçinde: Yüz İskeletin Büyüme ve Gelişimi. *Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Yayınları Yayın*, (30).
9. **Proffit, W. R., Fields, H., Larson, B. ve Sarver, D. M.** (2019). *Contemporary Orthodontics, 6e: South Asia Edition-E-Book*. Elsevier Health Sciences.
10. **Festa, F., Festa, M., Medori, S., Perrella, G., Valentini, P., Bolino, G.,** (2024). Midpalatal Suture Maturation in Relation to Age, Sex, and Facial Skeletal Growth Patterns: A CBCT Study. *Children*, 11(8), 1013.
11. **Shayani, A., Merino-Gerlach, M. A., Garay-Carrasco, I. A., Navarro-Cáceres, P. E. ve Sandoval-Vidal, H. P.** (2023). Midpalatal Suture Maturation Stage in 10-to 25-Year-Olds Using Cone-Beam Computed Tomography—A Cross-Sectional Study. *Diagnostics*, 13(8), 1449.
12. **Weaver, N., Glover, K., Major, P., Varnhagen, C. ve Grace, M.** (1998). Age limitation on provision of orthopedic therapy and orthognathic surgery. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 113(2), 156-164.
13. **Angelieri, F., Cevdanes, L. H., Franchi, L., Gonçalves, J. R., Benavides, E. ve McNamara Jr, J. A.** (2013). Midpalatal suture maturation: classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 144(5), 759-769.
14. **Hansman, C. F.** (1966). Growth of interorbital distance and skull thickness as observed in roentgenographic measurements. *Radiology*, 86(1), 87-96.

15. **Cobb, W.** (1955). The age incidence of suture closure. *American Journal of Physical Anthropology*, 13(2), 394-401.
16. **Persson, M. ve Thilander, B.** (1977). Palatal suture closure in man from 15 to 35 years of age. *American journal of orthodontics*, 72(1), 42-52.
17. **Ovsenik, M.** (2009). Incorrect orofacial functions until 5 years of age and their association with posterior crossbite. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(3), 375-381.
18. **Chung, C.-H.** (2019). Diagnosis of transverse problems. *Seminars in Orthodontics*, 125(1), 16-23.
19. **Okeson, J.** (2013). Management of temporomandibular disorders and occlusion. *Mosby Elsevier*, 129.
20. **Bishara, S. E. ve Staley, R. N.** (1987). Maxillary expansion: clinical implications. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 91(1), 3-14.
21. **Iodice, G., Danzi, G., Cimino, R., Paduano, S. ve Michelotti, A.** (2016). Association between posterior crossbite, skeletal, and muscle asymmetry: a systematic review. *European Journal of Orthodontics*, 38(6), 638-651.
22. **King, L., Harris, E. F. ve Tolley, E. A.** (1993). Heritability of cephalometric and occlusal variables as assessed from siblings with overt malocclusions. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 104(2), 121-131.
23. **Lindquist, J., Graber, T. ve Swain, B.** (1975). Current Orthodontic concepts and techniques. WB Saunders Co. Philadelphia.
24. **Andrade, A. S., Gameiro, G. H., DeRossi, M. ve Gavião, M. B. D.** (2009). Posterior crossbite and functional changes: a systematic review. *The angle orthodontist*, 79(2), 380-386.
25. **Moss, M. L.** (2007). The differential roles of periosteal and capsular functional matrices in orofacial growth. *The European Journal of Orthodontics*, 29(suppl_1), i96-i101.
26. **Allen, D., Rebellato, J., Sheats, R. ve Ceron, A. M.** (2003). Skeletal and dental contributions to posterior crossbites. *The Angle Orthodontist*, 73(5), 515-524.
27. **Melink, S., Vagner, M. V., Hocevar-Boltezar, I., Ovsenik, M.** (2010). Posterior crossbite in the deciduous dentition period, its relation with sucking habits, irregular orofacial functions, and otolaryngological findings. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 138(1), 32-40.
28. **Haas, A.** (1980). Long-term posttreatment evaluation of rapid palatal expansion. *The Angle Orthodontist*, 50(3), 189-217.
29. **Lione, R., Buongiorno, M., Franchi, L. ve Cozza, P.** (2014). Evaluation of maxillary arch dimensions and palatal morphology in mouth-breathing children by using digital dental casts. *International journal of pediatric otorhinolaryngology*, 78(1), 91-95.
30. **Sawchuk, D., Currie, K., Vich, M. L., Palomo, J. M. ve Flores-Mir, C.** (2016). Diagnostic methods for assessing maxillary skeletal and dental transverse deficiencies: A systematic review. *The korean journal of orthodontics*, 46(5), 331-342.
31. **Betts, N. J.** (2016). Surgically assisted maxillary expansion. *Atlas of the oral and maxillofacial surgery clinics of North America*, 24(1), 67-77.
32. **Proffit, W. R., Fields, H., Msd, D. M., Larson, B. ve Sarver, D. M.** (2019). *Contemporary Orthodontics, 6e: South Asia Edition-E-Book*. Elsevier India.

33. **Zhang, C.-x., Tan, X.-m., Wu, W., Liu, H., Liu, Y., Qu, X.-r.** (2021). Reliability of 2 methods in maxillary transverse deficiency diagnosis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 159(6), 758-765.
34. **Pinto, A. S., Buschang, P. H., Throckmorton, G. S. ve Chen, P.** (2001). Morphological and positional asymmetries of young children with functional unilateral posterior crossbite. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 120(5), 513-520.
35. **Löfstrand-Tideström, B., Thilander, B., Ahlqvist-Rastad, J., Jakobsson, O. ve Hultcrantz, E.** (1999). Breathing obstruction in relation to craniofacial and dental arch morphology in 4-year-old children. *The European Journal of Orthodontics*, 21(4), 323-332.
36. **Markkanen, S., Niemi, P., Rautiainen, M., Saarenpää-Heikkilä, O., Himanen, S.-L., Satomaa, A.-L.** (2019). Craniofacial and occlusal development in 2.5-year-old children with obstructive sleep apnoea syndrome. *European journal of orthodontics*, 41(3), 316-321.
37. **Tang, H., Liu, Q., Lin, J.-H. ve Zeng, H.** (2019). Three-dimensional morphological analysis of the palate of mouth-breathing children in mixed dentition. *Hua xi kou qiang yi xue za zhi= Huaxi kouqiang yixue zazhi= West China journal of stomatology*, 37(4), 389-393.
38. **Lehman Jr, J. A., Haas, A. J., Haas, D. G. ve Kaban, L. B.** (1984). Surgical orthodontic correction of transverse maxillary deficiency: a simplified approach. *Plastic and reconstructive surgery*, 73(1), 67-68.
39. **Schindel, R. H. ve Duffy, S. L.** (2007). Maxillary transverse discrepancies and potentially impacted maxillary canines in mixed-dentition patients. *The Angle Orthodontist*, 77(3), 430-435.
40. **Ghosh, S., Vengal, M., Pai, K. M. ve Abhishek, K.** (2010). Remodeling of the antegonial angle region in the human mandible: a panoramic radiographic cross-sectional study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 15(5), e802-807.
41. **Major, P. W., Johnson, D. E., Hesse, K. L. ve Glover, K. E.** (1994). Landmark identification error in posterior anterior cephalometrics. *The Angle Orthodontist*, 64(6), 447-454.
42. **Lee, K. J., Jeon, H. H., Boucher, N. ve Chung, C.-H.** (2022). Transverse analysis of maxilla and mandible in adults with normal occlusion: a cone beam computed tomography study. *Journal of imaging*, 8(4), 100.
43. **Ricketts, R. M., Bench, R. W., Hilgers, J. J. ve Schulhof, R.** (1972). An overview of computerized cephalometrics. *American Journal of Orthodontics*, 61(1), 1-28.
44. **Ricketts, R. M. ve Grummons, D.** (2003). Frontal Cephalometrics: Practical Applications, Part I. *World Journal of Orthodontics*, 4(4).
45. **Wagner, D. M. ve Chung, C.-H.** (2005). Transverse growth of the maxilla and mandible in untreated girls with low, average, and high MP-SN angles: a longitudinal study. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 128(6), 716-723.
46. **Tai, B., Goonewardene, M. S., Murray, K., Koong, B. ve Islam, S. M. S.** (2014). The reliability of using postero-anterior cephalometry and cone-beam CT to determine transverse dimensions in clinical practice. *Australian orthodontic journal*, 30(2), 132-142.
47. **Sokmen, T., Bağcı, N. ve Balos Tuncer, B.** (2024). Buccolingual inclination of posterior dentition in maxillary impacted canine patients using quadrant

- analysis-A cone-beam computed tomographic study. *BMC Oral Health*, 24(1), 1012.
48. **Ahn, J.-W., Choi, J.-Y. ve Kim, S.-H.** (2024) Is midpalatal suture maturation the major predictor of the success rate of pure bone-borne maxillary skeletal expander?: a CBCT study. *Seminars in Orthodontics*, 31(2), 290-298.
 49. **Walter, A., Winsauer, H., Crespo, E., Walter, D., Winsauer, C., Schwärzler, A.** (2024). Adult maxillary expansion: CBCT evaluation of skeletal changes and determining an efficiency factor between force-controlled polycyclic slow activation and continuous rapid activation for mini-screw-assisted palatal expansion-MASPE vs. MARPE. *Head & Face Medicine*, 20(1), 70.
 50. **El, H. ve Palomo, J. M.** (2014). Three-dimensional evaluation of upper airway following rapid maxillary expansion: a CBCT study. *The Angle Orthodontist*, 84(2), 265-273.
 51. **Almuzian, M., Ju, X., Almukhtar, A., Ayoub, A., Al-Muzian, L. ve McDonald, J. P.** (2018). Does rapid maxillary expansion affect nasopharyngeal airway? A prospective Cone Beam Computerised Tomography (CBCT) based study. *the surgeon*, 16(1), 1-11.
 52. **Howe, R. P., McNamara Jr, J. A. ve O'connor, K. A.** (1983). An examination of dental crowding and its relationship to tooth size and arch dimension. *American journal of orthodontics*, 83(5), 363-373.
 53. **Okunami, T. R., Kusnoto, B., BeGole, E., Evans, C. A., Sadowsky, C. ve Fadavi, S.** (2007). Assessing the American Board of Orthodontics objective grading system: digital vs plaster dental casts. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 131(1), 51-56.
 54. **Costalos, P. A., Sarraf, K., Cangialosi, T. J. ve Efstratiadis, S.** (2005). Evaluation of the accuracy of digital model analysis for the American Board of Orthodontics objective grading system for dental casts. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 128(5), 624-629.
 55. **Ahn, J., Kim, S.-J., Lee, J.-Y., Chung, C. J. ve Kim, K.-H.** (2017). Transverse dental compensation in relation to sagittal and transverse skeletal discrepancies in skeletal Class III patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 151(1), 148-156.
 56. **Ülgen, M.** (1993). Ortodontik tedavi prensipleri (4. Baskı.). *Dilek-Örünç Matbaası, İstanbul, Bölüm, 8.*
 57. **Andrews, L. F.** (2015). The 6-elements orthodontic philosophy: Treatment goals, classification, and rules for treating. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 148(6), 883-887.
 58. **Yavuz, İ. ve Çakmak, G.** (2017). Maksiller darlık ve mandibular asimetrinin teşhis yöntemleri. *Sağlık Bilimleri Dergisi*, 26(2), 169-174.
 59. **Bell, R. A.** (1982). A review of maxillary expansion in relation to rate of expansion and patient's age. *American journal of orthodontics*, 81(1), 32-37.
 60. **LINDNER, A.** (1989). Longitudinal study on the effect of early interceptive treatment in 4-year-old children with unilateral cross-bite. *European Journal of Oral Sciences*, 97(5), 432-438.
 61. **Zambon, C., Cecchetti, M., Utumi, E., Pinna, F., Machado, G., Peres, M.** (2012). Orthodontic measurements and nasal respiratory function after surgically assisted rapid maxillary expansion: an acoustic rhinometry and rhinomanometry study. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 41(9), 1120-1126.

62. **Mew, J.** (1997). In favor of semirapid expansion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 112(4), 20A-21A.
63. **Rosvall, M. D., Fields, H. W., Ziuchkovski, J., Rosenstiel, S. F. ve Johnston, W. M.** (2009). Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(3), 276.
64. **Kravitz, N. D., Kusnoto, B., BeGole, E., Obrez, A. ve Agran, B.** (2009). How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(1), 27-35.
65. **Zhou, N. ve Guo, J.** (2020). Efficiency of upper arch expansion with the Invisalign system. *The Angle Orthodontist*, 90(1), 23-30.
66. **Cao, Y., Zhou, Y., Song, Y. ve Vanarsdall Jr, R. L.** (2009). Cephalometric study of slow maxillary expansion in adults. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 136(3), 348-354.
67. **Huynh, T., Kennedy, D. B., Joondeph, D. R. ve Bollen, A.-M.** (2009). Treatment response and stability of slow maxillary expansion using Haas, hyrax, and quad-helix appliances: a retrospective study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(3), 331-339.
68. **Venkateshwaran, K., Kaur, S. ve Shaon.** (2021) S. Slow maxillary expansion: A review. *International Journal of Health Sciences*, 5(S2), 303-314.
69. **Bassarelli, T., Dalstra, M. ve Melsen, B.** (2005). Changes in clinical crown height as a result of transverse expansion of the maxilla in adults. *The European Journal of Orthodontics*, 27(2), 121-128.
70. **Júnior, A. J. M. ve Crespo, A. N.** (2006). Cephalometric study of alterations induced by maxillary slow expansion in adults. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 72(2), 166-172.
71. **Lagravere, M. O., Major, P. W. ve Flores-Mir, C.** (2005). Skeletal and dental changes with fixed slow maxillary expansion treatment: a systematic review. *The Journal of the American Dental Association*, 136(2), 194-199.
72. **Hicks, E. P.** (1978). Slow maxillary expansion: a clinical study of the skeletal versus dental response to low-magnitude force. *American journal of orthodontics*, 73(2), 121-141.
73. **İşeri, H. ve Özsoy, S.** (2004). Semirapid maxillary expansion—a study of long-term transverse effects in older adolescents and adults. *The Angle Orthodontist*, 74(1), 71-78.
74. **Angell, E.** (1860). Treatment of irregularity of the permanent or adult teeth. *Dent Cosmos*, 1, 540-544.
75. **Haas, A. J.** (1961). Rapid expansion of the maxillary dental arch and nasal cavity by opening the midpalatal suture. *The Angle Orthodontist*, 31(2), 73-90.
76. **de Almeida, A. M., Ozawa, T. O., Alves, A. C. d. M., Janson, G., Lauris, J. R. P., Ioshida, M. S. Y.** (2017). Slow versus rapid maxillary expansion in bilateral cleft lip and palate: a CBCT randomized clinical trial. *Clinical oral investigations*, 21, 1789-1799.
77. **Pithon, M. M., Marañón-Vásquez, G. A., da Silva, L. P., da Silva Coqueiro, R., Dos Santos, R. L., Tanaka, O. M.** (2022). Effect of treatment of transverse maxillary deficiency using rapid palatal expansion on oral health-related quality of life in children: A randomized controlled trial. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 161(2), 172-181.

78. **Torres, D., Lopes, J., Magno, M. B., Cople Maia, L., Normando, D. ve Leão, P. B.** (2020). Effects of rapid maxillary expansion on temporomandibular joints: A systematic review. *The Angle Orthodontist*, 90(3), 442-456.
79. **Ölmez, H., Akin, E. ve Karacay, Ş.** (2007). Multitomographic evaluation of the dental effects of two different rapid palatal expansion appliances. *The European Journal of Orthodontics*, 29(4), 379-385.
80. **Reed, N., Ghosh, J. ve Nanda, R. S.** (1999). Comparison of treatment outcomes with banded and bonded RPE appliances. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 116(1), 31-40.
81. **Asanza, S., Cisneros, G. J. ve Nieberg, L. G.** (1997). Comparison of Hyrax and bonded expansion appliances. *The Angle Orthodontist*, 67(1), 15-22.
82. **Sarver, D. M. ve Johnston, M. W.** (1989). Skeletal changes in vertical and anterior displacement of the maxilla with bonded rapid palatal expansion appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 95(6), 462-466.
83. **Howe, R. P.** (1982). Palatal expansion using a bonded appliance: report of a case. *American journal of orthodontics*, 82(6), 464-468.
84. **McNamara, J. A., Brudon, W. L., Kokich, V. G.** (2001). *Orthodontics and dentofacial orthopedics*. Needham Press Ann Arbor.
85. **Cantarella, D., Dominguez-Mompell, R., Moschik, C., Mallya, S. M., Pan, H. C., Alkahtani, M. R.** (2018). Midfacial changes in the coronal plane induced by microimplant-supported skeletal expander, studied with cone-beam computed tomography images. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 154(3), 337-345.
86. **Melsen, B.** (1975). Palatal growth studied on human autopsy material: a histologic microradiographic study. *American journal of orthodontics*, 68(1), 42-54.
87. **Sperl, A., Gaalaas, L., Beyer, J. ve Grünheid, T.** (2021). Buccal alveolar bone changes following rapid maxillary expansion and fixed appliance therapy. *The Angle Orthodontist*, 91(2), 171-177.
88. **Alagöz, E., Ünver, T., Kurt, G. ve Dolanmaz, D.** (2022). Cerrahi Destekli Hızlı Maksiller Genişletme Sonrası Değişikliklerin Radyolojik Değerlendirilmesi: Derleme Çalışması. *Selcuk Dental Journal*, 9(1), 288-298.
89. **Mommaerts, M.** (1999). Transpalatal distraction as a method of maxillary expansion. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 37(4), 268-272.
90. **Timms, D. ve Vero, D.** (1981). The relationship of rapid maxillary expansion to surgery with special reference to midpalatal synostosis. *British Journal of Oral Surgery*, 19(3), 180-196.
91. **Alpern, M. C. Yurosko, J. J.** (1987). Rapid palatal expansion in adults: with and without surgery. *The Angle Orthodontist*, 57(3), 245-263.
92. **Gauthier, C., Voyer, R., Paquette, M., Rompré, P. ve Papadakis, A.** (2011). Periodontal effects of surgically assisted rapid palatal expansion evaluated clinically and with cone-beam computerized tomography: 6-month preliminary results. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139(4), S117-S128.
93. **Williams, B. J., Currimbhoy, S., Silva, A. ve O'Ryan, F. S.** (2012). Complications following surgically assisted rapid palatal expansion: a retrospective cohort study. *Journal of oral and maxillofacial surgery*, 70(10), 2394-2402.

94. **Wilmes, B., Tarraf, N. ve Drescher, D.** (2021). Treatment of maxillary transversal deficiency by using a mini-implant-borne rapid maxillary expander and aligners in combination. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 160(1), 147-154.
95. **Lione, R., Paoloni, V., Bartolommei, L., Gazzani, F., Meuli, S., Pavoni, C.** (2021). Maxillary arch development with Invisalign system: Analysis of expansion dental movements on digital dental casts. *The Angle Orthodontist*, 91(4), 433-440.
96. **Tai, S. K.** (2018). Clear Aligner Technique. Quintetessence. HanoverPark
97. **Fatani, E., Alkhamisi, H. B., Arishi, F. O., Altaweel, S. M., Asiri, M. A., Albuni, W. W.** (2023). Impact of Invisalign G-series Updates on Improving Predicted Outcomes: A Retrospective Study. *Cureus*, 15(12).
98. **Moshiri, M., Kravitz, N. D., Nicozisis, J. ve Miller, S.** (2021). Invisalign eighth-generation features for deep-bite correction and posterior arch expansion. *Seminars in Orthodontics*, 27(3), 175-178.
99. **Align Technology.** (n.d.). *SmartForce plak aktivasyonlu Invisalign G8*. Retrieved August 4, 2025, from <https://learn.aligntech.com/learn/learning-plans/5589/ekspansiyon/courses/11133/smartforce-plak-aktivasyonlu-invisalign-g8/lessons>
100. **Moshiri, M.** (2021). Product review and demonstration of the Invisalign clear aligner system. *AJO-DO CLINICAL COMPANION*, 1(1), 7-21.
101. **Align Technology.** (n.d.). *SmartForce® features and protocols*. Retrieved August 4, 2025, from <https://learn.aligntech.com/learn/learning-plans/5589/ekspansiyon/courses/15604/smartforcer-ozellikleri-protokolleri/lessons/45536:4459/plan-smartforcer-ozellikleri-protokolleri-emeatrv2>
102. **Krishnan, V. ve Davidovitch, Z. E.** (2006). Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 129(4), 469..
103. **Schwarz, A. M.** (1932). Tissue changes incidental to orthodontic tooth movement. *International Journal of Orthodontia, Oral Surgery and Radiography*, 18(4), 331-352.
104. **Nanda, R.** (2005). *Biomechanics and esthetic strategies in clinical orthodontics*. Elsevier Health Sciences.
105. **Moya, S. P. ve Zafra, J. L.** (2021). Aligner techniques in Orthodontics. John Wiley & Sons.
106. **Rossini, G., Parrini, S., Castroflorio, T., Deregibus, A. ve Debernardi, C. L.** (2015). Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *The Angle Orthodontist*, 85(5), 881-889.
107. **Nanda, R., Castroflorio, T., Garino, F. ve Ojima, K.** (2021). *Principles and Biomechanics of Aligner Treatment-E-Book*. Elsevier Health Sciences.
108. **Lombardo, L., Arreghini, A., Ramina, F., Huanca Ghislanzoni, L. T. ve Siciliani, G.** (2017). Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study. *Progress in orthodontics*, 18, 1-12.
109. **Drake, C. T., McGorray, S. P., Dolce, C., Nair, M. ve Wheeler, T. T.** (2012). Orthodontic tooth movement with clear aligners. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1), 657973.
110. **Simon, M., Keilig, L., Schwarze, J., Jung, B. A. ve Bourauel, C.** (2014). Treatment outcome and efficacy of an aligner technique—regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC oral health*, 14, 1-7.

111. **Kravitz, N. D., Kusnoto, B., Agran, B. ve Viana, G.** (2008). Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with Invisalign: a prospective clinical study. *The Angle Orthodontist*, 78(4), 682-687.
112. **Melsen, B., Agerbaek, N. ve Markenstam, G.** (1989). Intrusion of incisors in adult patients with marginal bone loss. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(3), 232-241.
113. **Al-Samman, M., Sadek, M. ve Hamdan, A. M.** (2024). Comparison of the predicted and achieved labiolingual inclinations of the maxillary central incisors in adult Class II division 2 malocclusions treated with clear aligners. *Korean Journal of Orthodontics*, 54(6), 403-410.
114. **Phan, X. ve Ling, P. H.** (2007). Clinical limitations of Invisalign. *Journal of the Canadian Dental Association*, 73(3).
115. **Joffe, L.** (2003). Invisalign®: early experiences. *Journal of orthodontics*, 30(4), 348-352.
116. **Zawawi, K. H.** (2014). Orthodontic treatment of a mandibular incisor extraction case with Invisalign. *Case Reports in Dentistry*, 2014(1), 657657.
117. **Womack, W. R.** (2006). Four-premolar extraction treatment with Invisalign. *Journal of clinical orthodontics: JCO*, 40(8), 493-500.
118. **Katib, H. S., Hakami, A. M., Albalawei, M., Alhajri, S. A., Alruwaily, M. S., Almusallam, M. I.** (2024). Stability and success of clear aligners in orthodontics: a narrative review. *Cureus*, 16(1).
119. **Kau, C. H., Soh, J., Christou, T. ve Mangal, A.** (2023). Orthodontic aligners: current perspectives for the modern orthodontic office. *Medicina*, 59(10), 1773.
120. **Straumann Group.** (2025). *Quick Switch*. Retrieved August 4, 2025, from <https://www.straumann.com/clearcorrect/gb/en/landing/clearcorrect-quick-switch.html#:~:text=Seamless%20Digital%20Workflow>
121. **ClearCorrect.** (2025). *ClearPilot® - Introduction and Use*. Retrieved August 4, 2025, from <https://support.clearcorrect.com/hc/en-us/articles/4617115008279-ClearPilot-Introduction-and-Use>
122. **Stratasys.** (2020). *ClearCorrect expands production capacity for orthodontic aligners by 30 percent*. Retrieved August 4, 2025, from <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/clearcorrect-3d-printing/#:~:text=print%203D%20models%20throughout%20each>
123. **ClearCorrect.** (2022). *Aligner Wear Schedules*. Retrieved August 4, 2025, from <https://support.clearcorrect.com/hc/en-us/articles/209928837-Aligner-Wear-Schedules>
124. **ClearCorrect.** (2024). *Engagers (also known as Attachments)*. Retrieved August 4, 2025, from <https://support.clearcorrect.com/hc/en-us/articles/203836198-Engagers-also-known-as-Attachments>
125. **Flügge, T. V., Schlager, S., Nelson, K., Nahles, S. ve Metzger, M. C.** (2013). Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 144(3), 471-478.
126. **Dalaie, K., Fatemi, S. M. ve Ghaffari, S.** (2021). Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. *Progress in orthodontics*, 22, 1-11.

127. **Mantovani, E., Parrini, S., Coda, E., Cugliari, G., Scotti, N., Pasqualini, D.** (2021). Micro computed tomography evaluation of Invisalign aligner thickness homogeneity. *The Angle Orthodontist*, 91(3), 343-348.
128. **Ke, Y., Zhu, Y. ve Zhu, M.** (2019). A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. *BMC oral health*, 19, 1-10.
129. **Miller, K. B., McGorray, S. P., Womack, R., Quintero, J. C., Perelmuter, M., Gibson, J.** (2007). A comparison of treatment impacts between Invisalign aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 131(3), 302.
130. **White, D. W., Julien, K. C., Jacob, H., Campbell, P. M. ve Buschang, P. H.** (2017). Discomfort associated with Invisalign and traditional brackets: a randomized, prospective trial. *The Angle Orthodontist*, 87(6), 801-808.
131. **Shalish, M., Cooper-Kazaz, R., Ivgi, I., Canetti, L., Tsur, B., Bachar, E.** (2012). Adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Part I: a comparison between Labial, Lingual, and Invisalign™. *European journal of orthodontics*, 34(6), 724-730.
132. **Gao, M., Yan, X., Zhao, R., Shan, Y., Chen, Y., Jian, F.** (2021). Comparison of pain perception, anxiety, and impacts on oral health-related quality of life between patients receiving clear aligners and fixed appliances during the initial stage of orthodontic treatment. *European journal of orthodontics*, 43(3), 353-359.
133. **Fowler, B.** (2010). A comparison of root resorption between invisalign treatment and contemporary orthodontic treatment. University of Southern California.
134. **Yi, J., Xiao, J., Li, Y., Li, X. ve Zhao, Z.** (2018). External apical root resorption in non-extraction cases after clear aligner therapy or fixed orthodontic treatment. *Journal of Dental Sciences*, 13(1), 48-53.
135. **Al-Zainal, M. H., Anvery, S. ve Al-Jewair, T.** (2020). Clear aligner therapy may not prevent but may decrease the incidence of external root resorption compared to full fixed appliances. *Journal of Evidence Based Dental Practice*, 20(2), 101438.
136. **Mertoglu, I. E., Sahin, D. ve Seker, E. D.** (2025). Comparison of orthodontic adverse effects: braces versus clear aligners. *J Clin Pediatr Dent*, 49(1), 74-86.
137. **Pango Madariaga, A. C., Bucci, R., Rongo, R., Simeon, V., D'Antò, V. ve Valletta, R.** (2020). Impact of fixed orthodontic appliance and clear aligners on the periodontal health: a prospective clinical study. *Dentistry journal*, 8(1), 4.
138. **Hennessy, J., Garvey, T. ve Al-Awadhi, E. A.** (2016). A randomized clinical trial comparing mandibular incisor proclination produced by fixed labial appliances and clear aligners. *The Angle Orthodontist*, 86(5), 706-712.
139. **Kuncio, D., Maganzini, A., Shelton, C. ve Freeman, K.** (2007). Invisalign and traditional orthodontic treatment postretention outcomes compared using the American Board of Orthodontics objective grading system. *The Angle Orthodontist*, 77(5), 864-869.
140. **Zheng, M., Liu, R., Ni, Z. ve Yu, Z.** (2017). Efficiency, effectiveness and treatment stability of clear aligners: A systematic review and meta-analysis. *Orthodontics & craniofacial research*, 20(3), 127-133.
141. **Li, W., Wang, S. ve Zhang, Y.** (2015). The effectiveness of the Invisalign appliance in extraction cases using the the ABO model grading system: a

- multicenter randomized controlled trial. *International journal of clinical and experimental medicine*, 8(5), 8276.
142. **Boyd, R. L.** (2008). Esthetic orthodontic treatment using the invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. *Journal of dental education*, 72(8), 948-967.
 143. **Vlaskalic, V. ve Boyd, R.** (2001). Orthodontic treatment of a mildly crowded malocclusion using the Invisalign System. *Australian orthodontic journal*, 17(1), 41-46.
 144. **Hartogsohn, C. R. ve Sonnesen, L.** (2025). Clear Aligner Treatment: Indications, Advantages, and Adverse Effects—A Systematic Review. *Dentistry Journal*, 13(1), 40.
 145. **Di Spirito, F., D'Ambrosio, F., Cannatà, D., D'Antò, V., Giordano, F. ve Martina, S.** (2023). Impact of clear aligners versus fixed appliances on periodontal status of patients undergoing orthodontic treatment: a systematic review of systematic reviews. *Healthcare*, 11(9), 1340.
 146. **Buschang, P. H., Chastain, D., Keylor, C. L., Crosby, D. ve Julien, K. C.** (2019). Incidence of white spot lesions among patients treated with clear aligners and traditional braces. *The Angle Orthodontist*, 89(3), 359-364.
 147. **Tamer, I., Öztaş, E. ve Marşan, G.** (2019). Orthodontic treatment with clear aligners and the scientific reality behind their marketing: a literature review. *Turkish journal of orthodontics*, 32(4), 241.
 148. **Breznjak, N., Wasserstein, A. ve Protter, N.** (2023). Clear aligner biomechanical limitations: anchorage and couple (torque) development. *The Angle Orthodontist*, 93(5), 615-616.
 149. **Karras, T., Singh, M., Karkazis, E., Liu, D., Nimeri, G. ve Ahuja, B.** (2021). Efficacy of Invisalign attachments: a retrospective study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 160(2), 250-258.
 150. **Güngör, M., DüNDAR, M. ve Artunç, C.** (2005). Diş hekimliğinde gerilme analiz yöntemleri. *EÜ Dişhek Fak Derg*, 26, 107-116.
 151. **Ramoğlu, S. ve Ozan, O.** (2014). Diş hekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yöntemi. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 24(3).
 152. **Ebrahimi, F.** (2012). *Finite element analysis: new trends and developments*. BoD—Books on Demand.
 153. **Baiamonte, T., Abbate, M., Pizzarello, F., Lozada, J. ve James, R.** (1996). The experimental verification of the efficacy of finite element modeling to dental implant systems. *The Journal of oral implantology*, 22(2), 104-110.
 154. **DeTolla, D. H., Andreana, S., Patra, A., Buhite, R. ve Comella, B.** (2000). The role of the finite element model in dental implants. *Journal of Oral Implantology*, 26(2), 77-81.
 155. **Geng, J.-P., Tan, K. B. ve Liu, G.-R.** (2001). Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *The Journal of prosthetic dentistry*, 85(6), 585-598.
 156. **Moaveni, S.** (2011). *Finite element analysis theory and application with ANSYS, 3/e*. Pearson Education India.
 157. **Hughes, T. J.** (2003). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation.
 158. **Geng, J., Yan, W. ve Xu, W.** (2008). *Application of the finite element method in implant dentistry*. Springer Science & Business Media.
 159. **Nanda, R. S. ve Tosun, Y. S.** (2010). Biomechanics in orthodontics. *Principles and practice Hanover Park IL: Quintessence Publishing Co*, 38-39.

160. **Mow, V. C. ve Huiskes, R.** (2005). *Basic orthopaedic biomechanics & mechano-biology*. Lippincott Williams & Wilkins.
161. **Bölükbaşı, E.** (2017). Evaluation of the stress distribution during maxillary expansion in patients with different types of cleft lip and palate using the finite element analysis. *Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir*, 569.
162. **Kutz, M.** (1998). Mechanical engineers' handbook. (No Title).
163. **Sakaguchi, R. L. ve Powers, J. M.** (2011). *Craig's Restorative Dental Materials-E-Book: Craig's Restorative Dental Materials-E-Book*. Elsevier Health Sciences.
164. **Shetty, P., Hegde, A. ve Rai, K.** (2010). Finite element method—an effective research tool for dentistry. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 34(3), 281-285.
165. **Bathe, K.-J.** (2006). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
166. **Inan, M.** (1988). Cisimlerin Mukavemeti. *İTÜ Yayınları*, 6. Baskı; s.
167. **Adıgüzel, Ö.** (2010). Sonlu elemanlar analizi: Derleme bölüm I: Diş hekimliğinde kullanım alanları, temel kavramlar ve eleman tanımları. *Dicle Dişhekimliği Dergisi*, 11(1), 18-23.
168. **Craig, R. G.** (1980). *Restorative dental materials*. Mosby.
169. **Provatidis, C. G.** (2000). A comparative FEM-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament. *Medical engineering & physics*, 22(5), 359-370.
170. **Toms, S. R., Lemons, J. E., Bartolucci, A. A. ve Eberhardt, A. W.** (2002). Nonlinear stress-strain behavior of periodontal ligament under orthodontic loading. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 122(2), 174-179.
171. **Ramoğlu, S. ve Ozan, O.** (2014). Finite element methods in dentistry. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 24(3), 175-180.
172. **Oliveira, N. L., Da Silveira, A. C., Kusnoto, B. ve Viana, G.** (2004). Three-dimensional assessment of morphologic changes of the maxilla: a comparison of 2 kinds of palatal expanders. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 126(3), 354-362.
173. **Richmond, B. G., Wright, B. W., Grosse, I., Dechow, P. C., Ross, C. F., Spencer, M. A., ve ark.** (2005). Finite element analysis in functional morphology. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 283(2), 259-274.
174. **Liu, G.-R.** (2009). *Meshfree methods: moving beyond the finite element method*. CRC press.
175. **SrIREkha, A. ve Bashetty, K.** (2010). Infinite to finite: an overview of finite element analysis. *Indian Journal of Dental Research*, 21(3), 425-432.
176. **Dasy, H., Dasy, A., Asatrian, G., Rózsa, N., Lee, H.-F. ve Kwak, J. H.** (2015). Effects of variable attachment shapes and aligner material on aligner retention. *The Angle Orthodontist*, 85(6), 934-940.
177. **Gao, J., Guo, D., Zhang, X., Cheng, Y., Zhang, H., Xu, Y.** (2023). Biomechanical effects of different staging and attachment designs in maxillary molar distalization with clear aligner: a finite element study. *Progress in Orthodontics*, 24(1), 43.
178. **Zhang, Y., Hui, S., Gui, L. ve Jin, F.** (2023). Effects of upper arch expansion using clear aligners on different stride and torque: a three-dimensional finite element analysis. *BMC Oral Health*, 23(1), 891.

179. **Wang, Y., Long, H., Zhao, Z., Bai, D., Han, X., Wang, J.** (2025). Expert consensus on the clinical strategies for orthodontic treatment with clear aligners. *International Journal of Oral Science*, 17(1), 19.
180. **Malik, O. H., McMullin, A. ve Waring, D. T.** (2013). Invisible orthodontics part 1: invisalign. *Dental update*, 40(3), 203-215.
181. **Solano-Mendoza, B., Sonnemberg, B., Solano-Reina, E. ve Iglesias-Linares, A.** (2017). How effective is the Invisalign® system in expansion movement with Ex30' aligners? *Clinical oral investigations*, 21, 1475-1484.
182. **Djeu, G., Shelton, C. ve Maganzini, A.** (2005). Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 128(3), 292-298.
183. **Morris, J. W., Campbell, P. M., Tadlock, L. P., Boley, J. ve Buschang, P. H.** (2017). Prevalence of gingival recession after orthodontic tooth movements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 151(5), 851-859.
184. **Proffit, W., Fields, H. ve Sarver, D.** (2012). Chapter 8: the biologic basis of orthodontic therapy. *Contemporary orthodontics*.
185. **Grünheid, T., Loh, C. ve Larson, B. E.** (2017). How accurate is Invisalign in nonextraction cases? Are predicted tooth positions achieved? *The Angle Orthodontist*, 87(6), 809-815.
186. **Zhang, X.-J., He, L., Guo, H.-M., Tian, J., Bai, Y.-X. ve Li, S.** (2015). Integrated three-dimensional digital assessment of accuracy of anterior tooth movement using clear aligners. *The korean journal of orthodontics*, 45(6), 275-281.
187. **Knop, L., Gandini Jr, L. G., Shintcovsk, R. L. ve Gandini, M. R. E. A. S.** (2015). Scientific use of the finite element method in Orthodontics. *Dental press journal of orthodontics*, 20, 119-125.
188. **Aragon, M. L. S. d. C., Mendes Ribeiro, S. M., Fernandes Fagundes, N. C. ve Normando, D.** (2024). Effectiveness of dental arch expansion in the orthodontic treatment with clear aligners: a scoping review. *European Journal of Orthodontics*, 46(6), cjae059.
189. **Jacobs, J. D. ve Sinclair, P. M.** (1983). Principles of orthodontic mechanics in orthognathic surgery cases. *American journal of orthodontics*, 84(5), 399-407.
190. **Li, N., Wang, C., Yang, M., Chen, D., Tang, M., Li, D.** (2024). Effects of different tooth movement patterns and aligner thicknesses on maxillary arch expansion with clear aligners: a three-dimensional finite element study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1424319.
191. **Papadimitriou, A., Mousouleas, S., Gkantidis, N. ve Kloukos, D.** (2018). Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Progress in orthodontics*, 19(1), 37.
192. **Wheeler, T. T.** (2017). Orthodontic clear aligner treatment. *Seminars in Orthodontics*, 23(1), 83-89.
193. **Ahmed, T., Padmanabhan, S. ve Pottipalli Sathyanarayana, H.** (2023). Effects of varying attachment positions on palatal displacement of maxillary incisors with clear aligner therapy: a three-dimensional finite element analysis. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 84(3), 178-188.
194. **Karshi, N., Ocak, I., Akyıldız, M., Gögen, H. ve Dalci, O.** (2024). Evaluation of the effect of different attachment configurations on molar teeth in maxillary

- expansion with clear aligners—a finite element analysis. *BMC Oral Health*, 24(1), 921.
195. **Nakornnoi, T., Srirodjanakul, W., Chintavalakorn, R., Santiwong, P. ve Sipiyaruk, K.** (2024). The biomechanical effects of clear aligner trimline designs and extensions on orthodontic tooth movement: a systematic review. *BMC Oral Health*, 24(1), 1523.
 196. **Lyu, X., Cao, X., Yan, J., Zeng, R. ve Tan, J.** (2023). Biomechanical effects of clear aligners with different thicknesses and gingival-margin morphology for appliance design optimization. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 164(2), 239-252.
 197. **Clements, K. M., Bollen, A.-M., Huang, G., King, G., Hujoel, P. ve Ma, T.** (2003). Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: dental improvements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(5), 502-508.
 198. **Ma, S. ve Wang, Y.** (2023). Clinical outcomes of arch expansion with Invisalign: a systematic review. *BMC Oral Health*, 23(1), 587.
 199. **Galluccio, G., De Stefano, A. A., Horodynski, M., Impellizzeri, A., Guarnieri, R., Barbato, E.** (2023). Efficacy and accuracy of maxillary arch expansion with clear aligner treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4634.
 200. **Houle, J.-P., Piedade, L., Todescan Jr, R. ve Pinheiro, F. H. L.** (2017). The predictability of transverse changes with Invisalign. *The Angle Orthodontist*, 87(1), 19-24.
 201. **Haouili, N., Kravitz, N. D., Vaid, N. R., Ferguson, D. J. ve Makki, L.** (2020). Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 158(3), 420-425.
 202. **Thilagalavanian, A., Weir, T. ve Meade, M. J.** (2024). Analysis of predicted and achieved root angulation changes in teeth adjacent to maxillary premolar extraction sites in patients treated with the Invisalign appliance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 166(5), 423-432.
 203. **Hassanally, T., Rabal-Solans, A., Mediero-Pérez, M.-C. ve Nieto-Sánchez, I.** (2024). A comparison of the upper anterior teeth movements with optimized and conventional attachment. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 16(4), e480.
 204. **Papadimitriou, A., Mousouleas, S., Gkantidis, N. ve Kloukos, D.** (2018). Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Progress in orthodontics*, 19, 1-24.
 205. **Sultanoğlu, E., Gürel, H. G. ve Gülyurt, M.** (2024). The effects of different attachment types and positions on rotation movement in clear aligner treatments: a finite element analysis. *Cureus*, 16(8).
 206. **Mao, B., Tian, Y., Li, J. ve Zhou, Y.** (2023). Expansion rebound deformation of clear aligners and its biomechanical influence: a three-dimensional morphologic analysis and finite element analysis study. *The Angle Orthodontist*, 93(5), 572-579.
 207. **Wang, Y.-g., Zhu, G.-y., Liu, J.-q., Wang, Y.-f. ve Zhao, Z.** (2024). Dynamic biomechanical changes of clear aligners during extraction space closure: Finite element analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 165(3), 272-284. e273.

208. **Fan, D., Liu, H., Yuan, C.-Y., Wang, S.-Y. ve Wang, P.-L.** (2022). Effectiveness of the attachment position in molar intrusion with clear aligners: a finite element study. *BMC Oral Health*, 22(1), 474.
209. **Özcan, C., Lestriez, P., Özcan, M. ve Josset, Y.** (2024). Finite element analysis of dental structures: The role of mandibular kinematics and model complexity. *Frontiers in Dental Medicine*, 5, 1461909.
210. **Cheng, Y., Liu, X., Chen, X., Li, X., Fang, S., Wang, W.** (2022). The three-dimensional displacement tendency of teeth depending on incisor torque compensation with clear aligners of different thicknesses in cases of extraction: a finite element study. *BMC oral health*, 22(1), 499.
211. **Cao, H., Hua, X., Yang, L., Aoki, K., Shang, S. ve Lin, D.** (2025). A systematic review of biomechanics of clear aligners by finite element analysis. *BMC Oral Health*, 25, 1026.
212. **Arslan, D., Tozlu, M.** (2025). An evaluation of using detailing instruments on the final clear aligner for the alignment in the aesthetic zone - a randomised clinical trial. *Orthodontics & Craniofacial Research*,

