T.C.
SAĞLIK BİLİMLERİ ÜNİVERSİTESİ
GÜLHANE SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN PLAKLARIN MEKONOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN DİNAMİK SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

DT. MELİS BÜŞRA AŞKIN

ORTODONTİ ANABİLİM DALI
ORTODONTİ DOKTORA PROGRAMI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ/2024

T.C.
SAĞLIK BİLİMLERİ ÜNİVERSİTESİ
GÜLHANE SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN PLAKLARIN MEKONOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN DİNAMİK SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

DT. MELİS BÜŞRA AŞKIN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. SERKAN GÖRGÜLÜ
DOÇ. DR. GÖKHAN SERHAT DURAN

ORTODONTİ ANABİLİM DALI
ORTODONTİ DOKTORA PROGRAMI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ/2024

TEZ KABUL ONAYI

BEYAN

Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

• Mevcut tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu,

• Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

• Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

• Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

• Mevcut tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,

• Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

ÖZET

Bu çalışma, ısıyla şekillendirilen PET-G ve doğrudan 3D yazıcılarla üretilen TC-85 reçineleri kullanılarak yapılan indirekt ve direkt aligner'ların mekanik ve termal özelliklerini incelemektedir. LS DYNA ve ANSYS WORKBENCH sonlu elemanlar analiz programları aracılığıyla yapılan detaylı simülasyonlar, bu malzemelerin ortodontik diş tedavilerindeki etkinliklerini ve dayanıklılıklarını ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, TC-85 malzemesi, sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak meydana gelen şekil hafızası özelliği sayesinde, uygulanan yüksek kuvvetler altında bile başlangıç geometrisini koruma konusunda üstün bir performans sergilemiştir. Özellikle 600 Newton'luk bir kuvvet uygulandığında ve sıcaklık 352K/78,85°C'ye çıkarıldığında, TC-85 malzemesinin deformasyonu, sıcaklık düşürüldüğünde %92,49 oranında geri kazanılmıştır. Bu durum, TC-85'in yüksek ısıl dayanıklılığa ve elastikiyete sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın, PET-G malzemesi daha rijit bir yapı sergileyerek, benzer koşullar altında daha az deformasyon yaşamış ve böylece yüksek kuvvetlere daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu rijitlik, malzemenin başlangıç formunu kuvvet altında koruma kapasitesini sınırlamaktadır. PET-G'nin stres testlerinde daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiş, bu da malzemenin yük altında daha fazla sabit kaldığını ancak daha az esnek olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmamızda değerlendirilen her iki malzeme de belirli avantajlara sahiptir. TC-85, yüksek esnekliği ve sıcaklığa duyarlı şekil hafızası ile dişin istenilen bölgesine daha doğru kuvvet transferi sağlarken, PET-G'nin rijiditesi, özellikle yüksek mekanik stres altında daha stabil bir seçenek sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Direkt aligner, İndirekt aligner, PET-G, TC-85

ABSTRACT

This study investigates the mechanical and thermal properties of indirect and direct aligners fabricated using thermoformed PET-G and directly 3D-printed TC-85 resins. Detailed simulations conducted through LS DYNA and ANSYS WORKBENCH finite element analysis programs have demonstrated the efficacy and durability of these materials in orthodontic dental treatments. According to the analysis, the TC-85 material exhibited superior performance in maintaining its initial geometry under high forces due to its temperature-dependent shape memory characteristics. Specifically, when subjected to a force of 600 Newtons and a temperature increase to 352K/78.85°C, the deformation of TC-85 was remarkably recovered by 92.49% upon temperature normalization, highlighting its substantial thermal resilience and elasticity. In contrast, PET-G displayed greater rigidity, undergoing less deformation under similar conditions, thereby indicating higher resistance to mechanical stresses. However, this rigidity limits the material's ability to retain its initial form under force. Stress tests on PET-G revealed higher stress values, indicating that while the material remains more stationary under load, it is less flexible. Both materials assessed in this study possess distinct advantages: TC-85 ensures more accurate force application to desired dental regions through its high flexibility and temperature-sensitive shape memory, whereas PET-G offers stability under high mechanical stress.

Keywords: Direct aligner, Indirect aligner, PET-G, TC-85

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca benden yardım ve desteğini esirgemeyen, bu süreçte yoluma ışık tutan, tez sürecimde engin bilgileriyle beni daha çok bilimsel araştırmaya teşvik eden başta Danışman Hocalarım Prof. Dr. Serkan GÖRGÜLÜ ile Doç. Dr. Gökhan Serhat DURAN'a ve ortodonti anabilim dalındaki tüm hocalarıma, her günümüzü beraber geçirdiğimiz asistan arkadaşlarıma, desteğini her an üstümde hissettiğim annem Hicran BARKAN'a, proje kapsamında bana her anlamda destek olan Numesys ve Ansys Elite Channel Partner'e, Sayın Sema KAYA'ya, süreç içerisinde takım kaptanlığı yapan Yusuf Çağıl ACET'e, FEM analizine öncülük eden Kaan FERİKEL'e ve Ahmet Erol ile Zeynep Aslı ESEN'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ÇİZELGE LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. GENEL BİLGİLER 7
2.1. Termoplastik Şeffaf Hareketli Apareyler 7
2.1.1. Essix Sistem 8
2.1.2. Invisalign Sistemi 9
2.1.3. Clear Aligner Sistemi 11
2.2. Termoform İşlemi 13
2.3. Şeffaf Plak Tedavisinin Avantajları, Dezavantajları ve Sınırlılıkları 14
2.4. Şeffaf Plakların Üretim Süreçleri 18
2.4.1. Dijital Model Eldesi 19
2.4.2. 3B Diş Hareketi Planlama Yazılımları 21
2.4.3. 3B Yazıcıların Kullanımı 22
2.5. 3B Baskı ve 3B Yazıcılar 24
2.6. Şeffaf Plak Materyallerinin Direkt Üretimi 27
2.7. Termoform ve 3D Baskı İşlemlerinin Karşılaştırılması 31
3. GEREÇ VE YÖNTEMLER 35
3.1. Dental Model Ve Şeffaf Plak Modelinin Oluşturulması 35
3.2. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Cihaz ve Yazılımlar 35
4. BULGULAR 41
5. TARTIŞMA 57

6. SONUÇLAR 83
7. KAYNAKLAR 85

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4. 1. Malzemelerin Elastik Malzeme Özellikleri (46,47,48) 48
Çizelge 4. 2. TC-85'in ve PetG'nin dişe uyguladığı kuvvet ve moment değerleri..... 50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1. Direkt 3B Baskı İle Üretilmiş Şeffaf Plak (52)..... 28
Şekil 2. 2. Termoform şeffaf plakların üretim süreci..... 31
Şekil 2. 3. 3D baskı teknolojisi ile üretilen şeffaf plakların üretim süreci..... 32
Şekil 3. 1. Küre şekli verilen TC 85 numuneye ait şekil hafızası analizi kurgusu..... 36
Şekil 3. 2. Mekanik Kuvvet Etkisi Altında Küre Şekli Verilen Tc 85 Numunenin Deformasyon Sonucunu Gösteren Fem Analizi 37
Şekil 3. 3. Tc 85 Numunenin Termal Analiz Başında Ve Sonundaki Sıcaklık Değerleri 37
Şekil 3. 4. Termal analiz sırasında deformasyon üzerindeki değişimi..... 38
Şekil 4. 1. Tüm dişleri kapsayan şeffaf plak geometrisi 41
Şekil 4. 2. Clear Aligner geometrisi mesh değerlendirmesi 42
Şekil 4. 3. Sıcaklığın değişim eğrisi..... 42
Şekil 4. 4. TC 85 için oluşturulan analizin sonuç dataları 43
Şekil 4. 5. PETG için oluşturulan analizin sonuç dataları 43
Şekil 4. 6. 300K/26,86C'den 352K/78,85C'e Sıcaklığı Artırılan TC 85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri..... 44
Şekil 4. 7. 352K/78,85C den 310K/36,85C'e Sıcaklığı Azalan TC 85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri..... 45
Şekil 4. 8. PET-G/ TC85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri 46
Şekil 4. 9. Abraham McKay ve arkadaşlarının (63) oluşturmuş olduğu deney düzeneği. 47
Şekil 4. 10. Sırasıyla Analiz içerisinde kullanılan montaj geometrisi, santral diş, PDL, kemik dokusu..... 47
Şekil 4. 11. 11 Nolu Santral Dişe Ait Simülasyonda Kullanılan Full Body Kesit Görünüşü 48
Şekil 4. 12. Aspect Ratio ve Element Quality Değerleri 49
Şekil 4. 13. Aspect Ratio ve Element Quality Değerleri 49

Şekil 4. 14. TC-85'in ve PET-G'nin santral dişe uyguladığı kuvvet ve momentlerin kartezyen koordinat sisteminde gösterilmesi 50
Şekil 4. 15. TC 85 Ve PetG Plağın Full Body Üzerinde Oluşturuduğu Stress/Gerilme Sonuçları 51
Şekil 4. 16. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 51
Şekil 4. 17. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 52
Şekil 4. 18. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 52
Şekil 4. 19. TC 85 Ve PetG Plağın S Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları..... 53
Şekil 4. 20. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 54
Şekil 4. 21. TC 85 Ve PetG Plağın PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 54
Şekil 4. 22. TC 85 Ve PetG Plağın PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları 55
Şekil 4. 23. TC 85 Ve PetG Plağın Diş Ve PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları..... 55

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Ortodontik tedaviye duyulan ihtiyaç, her geçen gün artış göstermektedir. Bu durum, ortodontik tedavi seçeneklerinin geleneksel tedavi yöntemlerinden daha rahat, kolay ve estetik apareylere yönelmesine yol açmaktadır (Rossini, Parrini, Castroflorio, Deregibus, & Debernardi, 2015). Hastaların yoğun estetik iyileşme isteği, üstün işlevlere sahip ve estetik ortodontik apareylerin gelişimini hızlandırmıştır.

Günümüzde sözü edilen bu talepleri karşılamak amacıyla termoplastik malzeme ile aligner yerine şeffaf plak kullansan daha iyi olurüretimi gerçekleştirilmektedir (Lombardo, Srreghini, Maccarrone, Bianchi, Scalia, & Sicilliani, 2015; Pazzini, et al., 2018). Termoform işlemi sonucunda hasta modellerinde apareyler üretilmektedir. Ancak termoform işlemiyle üretilen plaklarda minimal geometrik hatalar görülmektedir (Malik, McMullin, & Waring, 2013). Bunların azaltılması amacıyla direkt olarak hasta kullanımına hazır, biyouyumluluğu yüksek şeffaf plakların üç boyutlu yazıcılardan direkt üretimi gündeme gelmiştir. Hataların minimize edilmesinin yanı sıra, zaman ve işgücü tasarrufu da bu yöntemle sağlanabilir durumdadır. Açıklandığı üzere üç boyutlu baskı teknolojileri, üstün geometrik konfigürasyonlar sağlamaktadır. Ancak doğrudan üç boyutlu baskıyla üretilen apareylerin çeşitli koşullardaki dayanımı, tüm bu avantajların yanında soru işareti olarak kalmaktadır (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019).

Üç boyutlu baskı teknolojileriyle üretilen plakların özellikleri ve çeşitli koşullardan etkilenme durumları, literatürde oldukça sınırlı biçimde ele alınmış bir konudur. Hertan ve diğerleri (2022) çalışmalarında, direkt baskı yöntemiyle üretilen alignerların (DPA) dikey boyutta uyguladığı kuvvetleri ölçmeyi amaçlamışlardır. Aynı zamanda bu kuvvet profillerini geleneksel yöntemle, termoform işlemle üretilen alignerlar (TFA) ile karşılaştırmayı ve yüzeyde yer almayan pürüzlerin DPA ve TFA özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmada kuvvet ölçüm aparatı kullanılmış ve TFA ve DPA üretimi için belirli reçineler kullanılmıştır. Sonuçlara göre, DPA'nın ağız içi sıcaklıklarda TFA'ya göre daha az kuvvet uyguladığı belirlenmiştir. TFA'nın yer değiştirmesi arttıkça kuvvetin de arttığı

görülürken, DPA'nın kuvvet profili daha tutarlı bir seyir izlemiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ise genel olarak her iki plakada da kuvveti azalttığı tespit edilmiştir. Araştırmanın sonucunda, DPA ve TFA'nın kuvvet özelliklerini etkilemek için yüzey pürüzlülüğünün yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Lee ve diğerleri (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246), geleneksel termoform ile üretim yönteminin sınırlamalarını aşmak için doğrudan 3D baskı yöntemiyle net plakların üretildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma, yeni bir malzeme olan direkt 3D baskılı net plaklar için kullanılan fotoküratif reçine TC-85'in termomekanik ve viskoelastik özelliklerini, geleneksel termoplastik malzeme olan polietilen tereftalat glikol ile karşılaştırarak incelemiştir. Dinamik mekanik analiz, her iki malzemenin mekanik davranışlarını sırasıyla 37 °C ve 80 °C'de incelemek için yapılmıştır. Ayrıca, her iki malzemenin şekil hafıza özelliği, U-şekilli bükme testi kullanılarak değerlendirilmiş ve 37 °C'de 60 dakika boyunca şekil geri kazanım oranı hesaplanmıştır. Sonuçlar, TC-85'in esnekliği ve viskoelastik özellikleri nedeniyle 3D baskılı net plaklar için dişlere sürekli hafif bir kuvvet uygulayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, net plakların tekrarlayan takılmasıyla indüklenen kuvvet azalmasının azaltılacağı ve sürekli bir ortodontik kuvvetin korunacağı öngörülmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda geometrik istikrarı ve şekil hafızası özellikleri, klinik uygulamalar için avantajlar sağlamaktadır.

Can ve diğerleri (2022) çalışmalarında, intraoral yaşlanmanın ardından yerinde üretilen üç boyutlu baskılı ortodontik apareylerin mekanik özelliklerindeki değişiklikleri incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma amacıyla on kontrol plak ve 4 hastadan alınan 6 materyalden oluşan bir grup kullanılmıştır. Kontrol grubundan alınan örnekler, attenuated total reflectance-Fourier-transform infrared (ATR-FTIR) spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Kontrol/deney gruplarından alınan örnekler reçineye gömülerek enstrümantal indentasyon testine (IIT) tabi tutulmuş, kuvvet-yerleşme derinliği eğrileri kaydedilmiş ve ISO 14577-1 (2002) standardına göre Martens sertliği (HM), yerleşme modülü (EIT), elastik indeks (ηIT) ve yerleşme rahatlaması indeksi (RIT) hesaplanmıştır. Kontrol ve deney 3D baskılı plaklar

arasındaki farklılıklar Mann–Whitney/t-testleri ile alfa=0.05 düzeyinde kontrol edilmiştir. ATR-FTIR analizi, plakların vinil ester-üretan malzemesinden yapıldığını göstermiştir. Tüm mekanik özellikler için deney ve kontrol plakları arasında fark bulunmamıştır. Test edilen 3D baskılı plakların mekanik özellikleri, 1 haftalık kullanımdan sonra etkilenmemiştir.

Goracci ve diğerleri (2023), ortodontik apareylerin üretimi için kullanılan 3D baskılanabilir malzemeler ve teknikler hakkındaki mevcut kanıları analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma, klinik olarak önemli malzeme özelliklerine odaklanmıştır. MEDLINE/PubMed, Scopus ve Cochrane Kütüphanesi veri tabanları taranmıştır. Başlangıçta 669 atıfın elde edilmesiyle başlayan süreç sonucunda nihayetinde niteliksel bir değerlendirme için 47 makale seçilmiştir. Birden fazla makale, çeşitli apareylerin üretimi için dijital iş akışını tanımlayan klinik olgularını içermiştir. 3D baskı teknolojisinin ortodontide en çok incelenen uygulaması apareylerin üretimidir ve Dental LT Clear Reçinesi (Formlabs) gibi malzemeler birçok çalışmada test edilmiştir. Ancak Tera Harz TC-85 (Graphy) şu anda direkt baskı için pazarlanan tek malzemedir. Aparey malzemelerinin mekanik özelliklerinin testleri protokollerde homojenlik eksikliği gösterirken, biyokompatibilite testleri intraoral koşulların eluant salınımına olan etkisini değerlendirememiştir. 3D baskı ile üretilen apareylerin estetik özellikleri büyük ölçüde keşfedilmemiştir. 3D baskı ile üretilen metalik apareylerle ilgili kanıtlar da sınırlıdır. 3D baskılabilir ortodontik malzemeler ve tekniklerle ilgili bilimsel kanılar, laboratuvar testleri için uluslararası standartların belirlenmesi ve gerekli klinik çalışmaların başlatılmasıyla güçlendirilmelidir.

Zinelis ve diğerleri (2022) çalışmalarında farklı 3D baskı cihazlarıyla üretilen ortodontik apareylerin mekanik özelliklerini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Beş farklı 3D yazıcı (Ka:rv LP 550, Swinwon, L120, Dazz 3D, MiiCraft 125, Miicraft Jena; Slash 2, Uniz ve Pro 95, SprintRay, dental reçine (Tera Harz TC-85DAW, Graphy) kullanılarak ortodontik plak hazırlamak için kullanılmıştır. Her bir plağın orta kesici dişleri kesilmiş, hazırlanmış ve ISO14577-1:2002'ye göre Martens-Sertlik (HM), indentasyon modülü (EIT) ve elastik indeks (ηIT) açısından değerlendirilmiştir. Kuvvet-indentasyon eğrileri kaydedilmiş ve yazıcılar arasındaki farklar genelleştirilmiş doğrusal regresyonlarla kontrol edilmiştir. Tüm mekanik

özellikler için istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlenmiştir. Sıvı kristal ekran (LCD) ve dijital ışık işleme (DLP) yazıcıları arasında anlamlı farklar bulunmuş ve önceki yazıcının plaklarının, sonraki yazıcının plaklarından daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sınırlamaları altında, 3D baskı ile üretilen ortodontik plakların mekanik özelliklerinin kullanılan 3D yazıcıya bağlı olduğu sonucuna varılmış ve bu nedenle klinik etkinliklerinde farklılıklar beklendiği belirtilmiştir.

TC-85, termoplastik bir reçine türü olup, üç boyutlu baskı yöntemiyle plakların üretiminde kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bu reçine, ısıtıldığında yumuşayarak, üzerine yerleştirildiği herhangi bir şekil veya kalıba uyum sağlamakta ve böylece istenilen forma bürünebilmektedir. Üç boyutlu baskı makineleri aracılığıyla, katman katman eklenen bu reçine kullanılarak istenilen geometriler kolaylıkla elde edilebilmektedir. TC-85, diş hekimliği alanındaki üç boyutlu baskı teknolojisinin sağladığı yeniliklerden yalnızca bir tanesidir. Bu termoplastik reçine, özelleştirilmiş ve etkili tedavi seçenekleri sunma potansiyeline sahip bir malzeme olarak, gelecekte diş hekimliği pratiğinde önemli bir yere sahip olabilir. Teknolojinin gelişimine paralel olarak, hastaların daha konforlu ve etkili tedavi deneyimleri elde etmeleri giderek daha fazla mümkün hale gelmektedir.

Geleneksel termoplastik üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, TC-85 ve benzeri üç boyutlu baskı teknolojileri, birçok avantaja sahiptir. Özellikle, geleneksel termoformlama süreçleri, çok sayıda laboratuvar işlemine ihtiyaç duyar ve bu işlemler sırasında kullanılan çok sayıda model, çevresel etki açısından endişe kaynağı olabilir. Her bir modelin üretimi, önemli miktarda atık malzeme üretimine yol açabilir ve bu durum çevresel sürdürülebilirlik açısından sorunlara neden olur. Ayrıca, bu yöntemler genellikle zaman alıcıdır ve yüksek maliyetler gerektirir. Üretim süreçleri boyunca ekstra personel ihtiyacı da ekonomik verimsizlikleri daha da artırır. Buna karşılık, TC-85 gibi malzemeleri kullanan üç boyutlu baskı teknolojileri, bu tür işlemleri büyük ölçüde basitleştirir. 3D baskı, azaltılmış atık ve daha düşük hammadde kullanımı ile çevreye olan etkiyi minimize ederken, işlem süresini önemli ölçüde kısaltır ve ek işgücü ihtiyacını ortadan kaldırır.

Bu bağlamda, TC-85'in kullanımı, diş hekimliği pratiğinde malzeme biliminde devrim yaratma potansiyeline sahip olarak değerlendirilebilir. Hastalara özelleştirilmiş tedavi seçenekleri sunma kapasitesi, bu yenilikçi malzemenin, gelecekteki diş hekimliği uygulamalarında vazgeçilmez bir rol oynamasını sağlayabilir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, bu tür malzemelerin kullanımı daha da yaygınlaşacak ve tedavi süreçlerini daha da verimli hale getirecektir.

Bu çalışmada, termoplastik şekillendirilen PET-G plaklar ve 3D yazıcılardan direkt olarak çıkarılan TC-85 reçine ile üretilen plakların, ortodontik diş tedavilerindeki etkisini araştırarak, bu malzemelerin mekanofiziksel özelliklerinin dinamik sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Termoplastik Şeffaf Hareketli Apareyler

Termoplastik malzemeler, ısıtıldığında yumuşayan ve soğuduklarında tekrar sertleşen "ısıya duyarlı plastikler grubu" tanımlanmaktadır. Termoplastik kelimesi kökenlerini Yunanca "thermos" (sıcak biçimlendirme) ve "plasso" (şekil vermek) kelimelerinden almaktadır (Özcan, 2022). İlk kez 1896 yılında üretilmiştir. Diş hareketi için ise ilk kez 1945 yılında Kesling tarafından kullanılmıştır (Kesling, 1945). Bant, braket veya teller olmadan, berrak görünümlü apareylerle küçük diş hareketleri elde edilmiştir. Kesling, bu uygulamayı esnek pozisyoner cihazıyla ortodontik tedavinin sonunda küçük diş hareketleri elde etmek için kullanmış ve etkisinin yalnızca küçük hareketlerde elde edilebileceğini bildirmiştir (Kesling, 1945). Marshall ve Horvay, 1959'da "Vacuum Former" cihazını tanıtmış ve bu basınçlı kalıplama aygıtıyla şeffaf aparey uygulamaları devam etmiştir. Ardından Nahoum bu cihazı kullanarak ilk aligner'ı üretmiş, bir hasta üzerinde uygulamış, sonuçları yayımlamıştır (Nahoum, 1964). Nahoum bu çalışmayı yayımladıktan sonra birçok araştırmacı hastalarında bu uygulamayı denemiştir (Lindauer & Shoff, 1998; McNamara, Kramer, & Juenker, 1985; Rinchuse, 1997).

Isıyla şekillendirilen şeffaf alignerların rutin olarak ortodontik tedavide kullanımı, 1960'lı yıllardan günümüze basınç kalıplama cihazlarının hızlı gelişimi sayesinde hız kazanmıştır. Bu cihazlar sayesinde, dişlere sıkıca oturan termoplastik plaklar hızlı ve kolay bir şekilde üretilebilir hale gelmiştir. Bu plaklar ilk başta ortodontik tedavi sonrası sabitleme amaçlı kullanılmıştır. Ancak kısa bir süre sonra, alçı model üzerinde dişlere uygulanan hareketle şekillendirilen termoplastik plakların diş hareketini sağlayabilen bir araç olduğu fark edilmiştir. Bu plaklar hafif çapraşıklıkların düzeltilmesine yardımcı olabilen özellikte oldukları için "aligner" olarak adlandırılmıştır. Özellikle ortodontik tedavi sonrası retansiyon cihazlarından vazgeçen hastalarda oluşan hafif çapraşıklıkların düzeltilmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Proffit, 2007).

Termoplastik malzeme katıdır. Bu nedenle tek bir şeffaf apareyle sağlanan diş hareketi az olmaktadır. Daha fazla diş hareketinin aynı plakla eldesi için yeni aligner yapılmalıdır ya da eldeki aligner şekillendirilmelidir. Isıtılmış özel penslerle plak yeniden şekillendirilebilmekte, bu şekilde daha fazla diş hareketi elde edilebilmektedir. Maliyet daha düşük olduğundan genellikle yeni bir plak yapımı yerine bu işlem tercih edilebilmektedir. Ancak bu işlemde plaklar maksimum 3 mm gerilime uğratılabilmektedir. Bu sınır aşıldığında plak diş hareketi sağlayamayacak şekilde incelmektedir. Bu sebeple yeniden şekillendirme işlemi gören alignerlar kontrolsüz ve az miktarda diş hareketi sağlamaktadır. Ayrıca kompleks ortodontik sorunlar bu işlemle çözülememektedir. Diş hareketinin daha fazla olması istenen durumlar için dişleri kademeli biçimde hareket ettiren aparey serilerinden oluşan teknikler gelişmiştir (Proffit, 2007). Temel olarak Essix, Invisalign ve Clear Aligner, şeffaf apareylerin kullanıldığı üç tekniği ifade etmektedir.

2.1.1. Essix Sistem

Essix, ilk defa 1993'te Sheridan (Sheridan, LeDoux, & McMinn, Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention, 1993) tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu aparey, uygun fiyatlı, estetik, rahat, kolayca yapılabilen ve hastalar tarafından kolayca kabul edilebilen bir çözüm olarak, Raintree Essix (Dentsply Sirona, ABD) şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, şeffaf plaklar alçı modellerin üstünde ısı ya da basınç yardımıyla şekillendirilir. Essix apareyleri, diş eksikliklerinde geçici köprü, temporomandibular eklem splinti, oklüzyon yükseltici, alışkanlık engelleyici, boşluk tutucu ve diş beyazlatma plakları dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu aparayler geliştirildikten sonra genellikle ortodontik uygulamalarda pekiştirme aracı olarak kullanılırken, günümüzde aktif plaklar olarak da diş hareketini sağlamak için de tercih edilmektedir (Sheridan, Hilliard, & Armbruster, Essix Appliance Technology: Applications, Fabrication and Rationale, 2003).

Sheridan'a göre, diş hareketini gerçekleştirebilmek için yeterli güç, uygun boşluk ve etkili bir sürenin mevcut olması gerekmektedir. Essix sisteminde, ortodontik kuvvet, plağın belirli bölgelerine Hilliard Thermoplier adlı özel pens ile

oluşturulan veya diş yüzeyine kompozit materyali ile oluşturulan çıkıntılar aracılığıyla iletilir. Plastiğin dinlenme durumuna geçme eğiliminden kaynaklanan rezilans, hedef dişe etki eden kuvvetlerin kaynağıdır. Dişlerin hareket edebilmesi için boşluklar oluşturmak için çalışma modelinde block-out uygulaması yapılabileceği gibi, plak içine düşük devirli el aletleriyle pencere açmak da mümkündür. Aparey, yemek yeme ve diş fırçalama dışında gün boyu kullanılmalıdır (Sheridan, Hilliard, & Armbruster, Essix Appliance Technology: Applications, Fabrication and Rationale, 2003).

Essix mekanizması, ortodontik kuvvetin kuron yüzeyine en etkili şekilde uygulanabileceği konumu seçme özgürlüğü sunarak klinisyene imkan tanır. Bu kuvvet, diş hareketinin türünü belirler. Örneğin, eğer insizal kenara yakın bir noktaya kuvvet uygulanırsa, hedef dişte daha fazla eğilme hareketi meydana gelirken, gingival kenara yakın bir noktaya uygulanırsa daha çok gövdesel hareket gerçekleşir. Essix yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilecek hareketler arasında eğilme, dönme, tork, dişin dışa hareketi ve dişin içe hareketi yer almaktadır (Sheridan, LeDoux, & McMinn, Essix appliances: minor tooth movement with divots and windows, 1994). Essix Sistemi'nde amaçlanan diş hareketi aylık olarak 1 mm'yi kapsar. Tek bir aparey kullanarak 2-3 mm'lik hareket elde edilebilir ve daha fazla hareket için yeni ölçümler alınıp yeni plaklar yapılması gerekebilir. Essix sistemi, genellikle 1 veya 2 plak içerdiği için düşük üretim maliyetine sahiptir (Sheridan, LeDoux, & McMinn, Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention, 1993).

2.1.2. Invisalign Sistemi

Invisalign fikri, 1997'te Stanford Üniversitesi bilgisayar mühendisliği öğrencileri olan Zia Chisti ve Kelsey Wirth tarafından önerilmiştir. Lise döneminde geleneksel braketlerle ortodontik tedavi gören Chisti, tedavi sonrasında uygulanan şeffaf pekiştirme apareylerini kısa sürelerle kullanmayı bıraktığında dişlerinin hafif biçimde yer değiştirdiğini fark etmiştir. Kullanıma geri dönünce ise kısa sürede dişlerinin istenen pozisyona geri döndüğünü gözlemlemiştir. Bu durumu temel alan Chisti ve Wirth, Align Technology şirketini kurarak, 3 boyutlu görüntüleme tekniklerini kullanarak ortodonti alanına taşınabilecek bir sistem geliştirmek

amacıyla çalışmalara başlamışlardır. Align Technology şirketinin içinde bulunan mühendisler ve ortodontistler, araştırmacıların fikirlerini ve Essix sisteminin temel prensiplerini kullanarak, laboratuvar tekniklerini ve CAD-CAM teknolojisini bir araya getirerek dişleri hareket ettirebilen şeffaf ve taşınabilir plak serilerini geliştirmişlerdir. Invisalign Sistemi, Align Technology tarafından 1998 yılında duyurulmuş ve 2000 yılının Mayıs ayında hastaların tedavisinde kullanılmaya başlanmıştır (Boyd, 1999).

Invisalign sisteminde, hastanın üst ve alt diş dizilimlerinden alınan ölçüler ve ısırma kayıtları, detaylı bir tedavi planıyla birlikte Invisalign laboratuvarına iletilmektedir. Bu ölçümler ve kapanış kayıtlarından sağlanan alçı modeller, lazer tarayıcı yardımıyla taranarak 3 boyutlu dijital modellere dönüştürülmektedir. Bilgisayar tabanlı bir yazılım olan Treat yazılımı kullanılarak, diş hareketleri simülasyonları gerçekleştirilmektedir. Bu yazılım sayesinde, dijital modeldeki diş pozisyonlarında doktorun isteklerine uygun olarak küçük değişiklikler yapılarak, sırayla diş hareketleri gerçekleştirilmekte ve sanal bir tedavi planı ortaya çıkarılmaktadır. Oluşturulan bu başlangıç planı, "ClinCheck" adlı bir program aracılığıyla hekim onayına sunulmaktadır. ClinCheck, Invisalign sistemini kullanmakta olan ve Invisalign web sitesine kayıtlı hekimler için tasarlanmış özel bir bilgisayar programıdır. Bu program, hekimin isteklerine uygun olarak düzenlenmiş tedavi planının 3 boyutlu sanal bir gösterimini sunmaktadır. Ayrıca planın hekim tarafından gözden geçirilmesine ve istenilen diş hareketlerine ulaşmak için gerekli gördüğü değişiklikleri istemesine de olanak tanımaktadır. Tedavi planı hekim tarafından onaylandıktan sonra her aşama için ortaya çıkarılan modeller kullanılarak stereolitografik modeller üretilmektedir. Bu stereolitografik modeller, üretim laboratuvarına iletilmektedir ve burada şeffaf plak serileri üretilmektedir. Ardından direkt olarak hekime iletilmektedir (Wong, 2001).

Invisalign sistemde kullanılan plaklar, metilen difenil diizosiyanat ve 1,6 heksanediol ile modifiye edilmiş poliüretan yapısına sahiptir. Difenil yapısı, materyalin ortodontik aparey olarak kullanımında gerekli dayanıklılık özelliğini sağlamaktadır (Schuster, Eliades, Zinelis, Eliades, & Bradley, 2004). Her bir plak 0,8 mm kalınlığında olup, her biri tek dişe ya da bir grup dişe 14 günde bir 0,25-0,33 mm

hareket sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu yöntemde her plak en az 2 hafta süreyle kullanılmaktadır. Invisalign apareyleri hareketli apareylerdir, bu nedenle hasta işbirliği tedavi sonucuna ulaşmak için ciddi düzeyde önem taşımaktadır. Apareylerin etkinliğinin sağlanması için hastaların günlük olarak minimum 22 saat boyunca apareylerini kullanması gerekmektedir. Bu yöntem, şeffaf ortodontik aparey kullanmak isteyen yetişkinler ve büyüme yönlendirmesi gerekmeyen gençler için uygundur (Wong, 2001).

2.1.3. Clear Aligner Sistemi

Kim, 1998 yılında Clear Aligner adını verdiği farklı bir tekniği sunarak önemli bir gelişmeye imza atmıştır. Bu yöntem, tüm tedaviyi kapsayan plakların seri üretimini sağlayan bir prensibi benimser ve Invisalign sistemi ile karşılaştırıldığında farklı bir yaklaşıma sahiptir. Clear Aligner yöntemi, her 3 haftada bir hastadan alınan ölçülerle ilgili alçı modelleri üzerinde uygulanan bir set-up işlemine dayanır. Bu set-up modeli, 0,5 mm, 0,625 mm ve 0,75 mm kalınlığındaki plastik levhalar (Duran, Scheu-dental, Germany) kullanılarak, basınç (Biostar, Scheu-dental, Germany) veya vakum (Essix, Dentsply, Reintree Essix, Metairie, LA) aygıtları kullanılarak şekillendirilir (Kim & Park, An aesthetic orthodontic treatment option: Fabrication and applications, 2008). Her 3 haftada bir yeni ölçüler alınmasının amacı, hekimin tedavinin ilerleyişini daha iyi kontrol edebilmesidir. Böylece diş hareketleri etkin biçimde gerçekleştirilir ve hastanın konforu sağlanmış olur. Farklı kalınlıklarda (ince, orta, kalın) üretilen apareyler genellikle hastaya birer hafta ara ile kullanıldığından, daha doğal ve kontrollü bir diş hareketi sağlanmaktadır (Kim T. W., Illustrated Clear Aligner Fabrication Procedure, 2007a).

Clear Aligner yöntemi, ilk süreçte alınan ölçülere dayandığından, istenen sonuçların elde edilemediği durumlarda tedavi planını değiştirme esnekliği sunar. Clear Aligner taşıyan bir hastanın dişlerine yönelik konservatif tedavi işlemleri kolayca uygulanabilir. Belli bir dönemde apareyini kullanmayan bir hastanın tedavisi geriye dönük biçimde değerlendirilebilir. Bu plakların önde gelen avantajları arasında estetik görünüm, kullanım rahatlığı, düşük maliyet, kolaylıkla klinik uygulanabilme ve nüks durumunda farklı çözüm sağlama özellikleri yer alır. Ancak,

Clear Aligner apareylerinin sınırlamaları arasında ekseni tam anlamıyla kontrol edememe ve hastaların sık aralıklarla ölçü almak üzere kontrole gelme gerekliliği yer almaktadır (Kim T. W., Clear Aligner Manual, 2007b).

Clear Aligner süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

1. Ölçü Alma: Ölçü alımı için polivinil siloksan (PVS) veya aljinat esaslı ölçü maddeleri kullanılır. Kaliteli sert alçı ile alınan ölçüler kalıplara dökülür.

2. Referans Çizgilerinin Çizimi: Set-up aşamasında modele ayrılan dişlerin doğru konumda olmasını sağlamak amacıyla dişler üzerinde dikey ve yatay referans çizgileri çizilir. Genellikle sağ ve sol 1. molar dişlerine noktalar işaretlenir, bu noktalar arası mesafe ölçülür ve alçı modele yazılır.

3. Model Kesimi ve Set-up İşlemi: Tedavi edilecek diş/dişler modelden ayrılır, kaideleri kısaltılarak güdük formu verilir. Düzeltilecek diş/dişlerin pozisyonu ayarlanır ve kaide mumu ile sabitlenir.

4. Set-up Sonrası Hareket Miktarının Kontrolü: Clear Aligner tedavisinde set-up işlemi ile gerçekleştirilen diş hareketleri özenle ölçülür. Aligner Aid Program (AAP) (IV-Tech, Güney Kore) adlı özel bir yazılım kullanılarak dijital görüntülerle set-up öncesi ve sonrası diş konumları karşılaştırılır ve hareket miktarları ölçülerek kontrol edilir. Yazılım, 0,1 mm hassasiyetle diş hareketlerini ölçebilir. Hareket miktarı genellikle 0,5-1 mm arasında olur, bu da hastanın rahatlığını ve periodontal dokulara baskıyı azaltmaya yardımcı olur.

5. Clear Aligner Üretimi: Hareket ettirilen dişlerin dayanıklılığını sağlamak için ışıkla sertleşen mavi opak block-out reçini (Blue Blokker, Scheu-dental, Germany) kullanılır. Set-up modelleri üzerinde 3 farklı kalınlıktaki plastik levha (0,5 mm, 0,625 mm, 0,75 mm) basınçlı kalıplama makinesiyle şekillendirilir. Şekillendirme sonrasında Essix diskleri (Dentsply Raintree Essix, Metairie, LA) ile çalışma modelinden ayrılır, kenarları Mayo makaslarıyla kesilir, cila işlemi yapılır ve dezenfekte edilir.

6. Teslimat: Apareyler, kalınlık ve diş dizisine göre ayrı paketlere yerleştirilir. Apareylerin, uyku dahil günde en az 17 saat kullanılması gerekmektedir.

2.2. Termoform İşlemi

Termoform işlemi, bir malzemenin ısıtılarak yumuşatılması ve ardından belirli bir kalıp veya şekil üzerine yerleştirilmesi sürecidir. Bu işlem, özellikle plastiklerin, termoplastik malzemelerin ve elastomerlerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem apareylerin üretiminde, şeffaf plaklar gibi ürünlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Vakum şekillendirme ve basınç şekillendirme, termoform işleminin alt kategorileridir ve malzemelerin şekillendirilme süreçlerinde farklı teknikler sağlamaktadır.

Termoform işleminin aşamaları aşağıda sıralanmaktadır:

1. Malzeme Seçimi: İlk adım, uygun bir termoplastik malzeme seçmektir. Bu malzemeler, ısıtıldığında yumuşar ve ardından soğuduklarında tekrar sertleşirler. Bu özellik, istenilen şekli elde etmek için kullanılan bir özelliktir.

2. Levha Hazırlığı: Seçilen termoplastik malzemeden ince bir levha hazırlanır. Bu levha, özel bir termoform makinesinde veya fırında şekillendirilecektir.

3. Isıtma Aşaması: Levha, önceden belirlenmiş bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu ısınma işlemi, malzemenin yumuşamasını sağlar, böylece şekillendirme işlemi yapılabilir hale gelir.

4. Şekillendirme Aşaması: Isınmış ve yumuşak levha, özel bir kalıp veya model üzerine yerleştirilir. Bu aşamada, levha istenilen şekli alır. Bu şekillendirme işlemi, ya vakum şekillendirme ya da basınç şekillendirme yöntemi ile gerçekleştirilir.

Vakum şekillendirme, levhanın üzerine yerleştirildiği kalıbın altında bir vakum oluşturularak gerçekleştirilir. Vakum, levhanın kalıba sıkıca oturmasını sağlar ve belirlenen şekli almasını sağlar. Bu yöntem genellikle düz yüzeyler ve basit

eğrilerin elde edilmesinde etkilidir. Basınç şekillendirme, levhanın hem üst hem de alt tarafına eşit bir basınç uygulayarak şekillendirilmesini içerir. Bu yöntem daha karmaşık ve derin şekillerin elde edilmesinde etkilidir. Isınmış levha, kalıp üzerine yerleştirildikten sonra, bir basınç uygulanır ve levha kalıba sıkıca oturur.

2.3. Şeffaf Plak Tedavisinin Avantajları, Dezavantajları ve Sınırlılıkları

Şeffaf plakların avantajları oldukça çeşitlidir ve modern ortodontik tedavilerde önemli bir rol oynamaktadır. Estetik görünüm açısından oldukça avantajlıdırlar, çünkü ideal estetik görünümü korur ve hastaların gülüşleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmazlar. Ayrıca, kullanımları son derece kolaydır ve bonding ile debonding gibi karmaşık işlemleri gerektirmezler, bu da tedavi sürecini basitleştirir. Tedavi randevuları da daha kısa sürer, bu da hastaların zamanını daha etkili bir şekilde kullanmalarını sağlar (Joffe, 2003; Weir, 2017).

Şeffaf plakların bir diğer önemli avantajı hem hastalar hem de hekimler için tedavi sürecini daha görünür hale getirebilmeleridir. Tedavi başlangıcında tedavinin sonucu ve süreci hastaya 3 boyutlu simülasyonlarla gösterilebilir, bu da hastanın tedaviye dair daha iyi bir fikir edinmesini sağlar (Joffe, 2003). Ayrıca, plaklar ağız hijyenini sağlamada da kolaylık sağlar, bu da periodontal problemlerin daha az görülmesine yardımcı olabilir. Plaklar aynı zamanda mine dekalsifikasyonu ve çürük oluşumunu minimum seviyeye indirir ve parafonksiyonel aşınmaları engeller (Joffe, 2003; Weir, 2017).

Ancak, şeffaf plak tedavisinin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, bu tedavi tipinde genellikle tipping hareketi meydana gelirken, kök hareketleri daha zor elde edilebilir (Phan & Ling, 2007). Ayrıca, plakların kalınlığı sebebiyle posterior bölgede intrüzyon meydana gelebilir ve intermaksiller düzeltim sınırlı olabilir. Şiddetli malokluzyonlarda tedavi sınırlı kalabilir ve ek cerrahi veya fonksiyonel tedavilere ihtiyaç duyulabilir (Joffe, 2003). Plakların takıp çıkarılabilir olması, bazı hastalarda tedavi sürecinin beklenen şekilde ilerlememesine neden olabilir, bu da kooperasyon düşüklüğü gibi sorunlara yol açabilir (Phan & Ling, 2007).

Şeffaf plakların sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle şiddetli rotasyona sahip dişler, sentrik ilişki ile sentrik oklüzyon arasındaki uyumsuzluklar, ön-arka yöndeki büyük uyumsuzluklar gibi durumlar tedavi için uygun olmayabilir. Ayrıca, belirli çapraşıklık, açık kapanış malokluzyonları veya kısa kron boyuna sahip dişler gibi vakalarda da şeffaf plak tedavisi yeterli sonuçları veremeyebilir (Phan & Ling, 2007).

Sonuç olarak, şeffaf plaklar modern ortodontik tedavilerde önemli bir yer tutmaktadır. Hem avantajları hem de dezavantajları göz önünde bulundurularak, her hasta için en uygun tedavi seçeneğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Tek başına şeffaf plak tedavisinin yeterli olmayabileceği düşünülen vakalarda, öncelikle bir aşamada şeffaf plak tedavisi uygulanabilir ve daha sonra geleneksel sabit tedavi yöntemine geçilebilir. Bazen aynı hastada alt ve üst çenelerde farklı mekanikler kullanarak tedavi gerçekleştirilebilir (Joffe, 2003; Kim & Echarri, 2007). Literatüre göre, şeffaf plaklarla yapılan tedavilerde geleneksel sabit tedavilere kıyasla benzer sonuçlar elde edilmediği görüşü de bulunmaktadır (Djeu, Shelton, & Maganzini, 2005; Kuncio, Maganzini, Shelton, & Freeman, 2007). Djeu ve arkadaşları (2005), Invisalign® ve geleneksel sabit tedavi uygulamalarını karşılaştırarak, şeffaf plak tedavisinin oklüzyon kontrolü ve ön-arka uyumsuzluk düzeltme konularında sabit tedavi kadar etkili olmadığını belirtmiştir. Bununla birlikte, Li ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada, gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olmadığını bulmuşlardır. Güncel bazı çalışmalarda, şeffaf plaklarla malokluzyon tedavisi konusunda geleneksel tedavi mekaniklerinin aynı düzeyde etkili olmadığı belirtilmektedir (Djeu, Shelton, & Maganzini, 2005; Pavoni, Lione, Lagana, & Cozza, 2011; Kuncio, Maganzini, Shelton, & Freeman, 2007; Li, Wang, & Zhang, 2015). Kimi çalışmalarda ise iki tedavi yöntemi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı vurgulanmıştır (Lanteri, Farronato, Lanteri, Caravita, & Cossellu, 2018; Gu, Tang, Skulski, Fields, Beck, & Firestone, 2017).

Şeffaf plak tedavisi ortodontik düzeltilerde estetik ve konfor sunmasıyla bilinmesine rağmen, bu teknolojinin birtakım sınırlılıkları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan biri, üretim sürecinin karmaşıklığıdır. Her hasta

için özelleştirilmiş tedavi planlaması gerektiren şeffaf plak tedavisi, hasta başına onlarca, hatta bazı durumlarda yüzlerce modelin üretilmesini gerektirir. Bu modeller, hastanın dişlerinin mevcut durumundan, tedavi sonrası hedeflenen konuma kadar olan her aşamayı kapsayan ayrıntılı bir dijital tarama sürecinden geçirilir. Üretim süreci, dijital tarama ile başlar; bu taramalar yüksek çözünürlüklüdür ve hasta başına özgü detaylı bir 3D model oluşturur. Daha sonra, bu modeller üzerinden, dişlerin planlanan hareketini küçük adımlarla gerçekleştirecek şekilde sıralı plaklar tasarlanır. Her bir plak, dişlerdeki mikro hareketleri yönlendirmek üzere ayrı bir aşama olarak fonksiyon görür. Bu durum özellikle kompleks maloklüzyon durumlarında, tedavi sürecinin uzamasına ve çok sayıda plak üretilmesine neden olur. Bu plakların üretimi, vakum formu yöntemi kullanılarak, yüksek sıcaklıkta yumuşatılmış termoplastik malzemelerin 3D baskı modelleri üzerine şekillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Her bir plak, tedavi planına uygun olarak kesilir, cilalanır ve hastaya gönderilmek üzere paketlenir. Bu süreç, hem zaman alıcı hem de maliyetli bir üretim sürecidir. Ayrıca, bu üretim metodunun çevresel etkisi de göz ardı edilemez. Tek kullanımlık plastik malzemelerin yüksek miktarlarda kullanımı, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik sorunlarını beraberinde getirir. Çevre üzerindeki bu olumsuz etkiler, ortodonti pratiğindeki yeşil girişimlerle çelişir ve sektördeki sürdürülebilirlik çabalarına zarar verebilir (Peter E, Monisha J, George SA. Are clear aligners environment friendly? American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2022;161(5):619-20; Al-Hashimi, R. Plastic waste with clear aligner therapy. Br Dent J. 2023;235(10):763; Veseli E, Veseli K, Behluli E. Recyclable aligners. Br Dent J, 2024;236(360)).

Peter ve ark. (Peter E, Monisha J, George SA. Are clear aligners environment friendly? American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2022;161(5):619-20) tarafından yapılan çalışmanın odak noktası şeffaf plak tedavisinin çevresel etkileridir. Peter ve arkadaşları, Invisalign'ın termoplastik poliüretan (SmartTrack) gibi çeşitli plastik bileşenlerden yapıldığını ve bunların büyük bir çoğunluğunun biyobozunur olmadığını belirtmişlerdir. Araştırma, plastik atıkların doğada ayrışmasının yüzlerce yıl sürebileceğini ve yanma sırasında zehirli dumanlar yayabileceğini ifade etmektedir. Dolayısıyla, şeffaf plak tedavisinin popülerleşmesi ile artan plak kullanımı, daha fazla plastik atığın ortaya çıkmasına yol

açmaktadır. Bu bağlamda, Peter ve arkadaşları, ortodonti sektöründe plastik atık yönetimi için 4R ilkesinin (azalt, yeniden kullan, geri dönüştür, geri kazan) benimsenmesinin zorunlu hale gelmesi gerektiğini savunmaktadırlar. Ancak, bu prensiplerin şeffaf plak uygulamalarına ne ölçüde entegre edilebileceği konusunda somut bir çözüm sunulmamıştır. Araştırmacılar, bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini öne sürerek, çevresel yükü azaltacak alternatif modeller üzerine yoğunlaşılması gerektiğini vurgulamaktadırlar.

Al-Hashimi (Al-Hashimi, R. Plastic waste with clear aligner therapy. Br Dent J. 2023;235(10):763), araştırmasında şeffaf plak terapisinin hem yetişkin hem de pediatrik hastalar arasında estetik iyileştirmeler sunmasının yanı sıra, konvansiyonel metal braketler kullanmadan bu iyileştirmeleri sağlamasının popülerleşmesinin altını çizmiştir. Ancak, şeffaf plak tedavisinin artan kullanımının sürdürülebilirlik çabaları ve karbon ayak izini azaltma hedefleriyle çeliştiği belirtilmiştir. Araştırma, dijital tarama, bilgisayar destekli tedavi planlaması ve her hareket için basılan 3D model çalışmaları kullanılarak üretilen şeffaf plakların, vakum formu yöntemiyle şekillendirildiğini ve daha sonra hastaya gönderilmek üzere paketlendiğini ifade etmektedir. Al-Hashimi, tedavi sürecinde, tahmin edilen diş hareketlerinin gerçekleşmemesi durumunda yeni çalışma modellerinin ve plakların üretildiğini, bu durumun çok miktarda plastik atık ve yüksek bir karbon ayak izi ile sonuçlandığını vurgulamıştır. Araştırma, diş hekimleri ve üreticilerin, çalışma modelleri için geri dönüştürülmüş plastik kullanılması ve planlanan tedaviye göre belirli sayıda plak basılmasının ardından tedavinin plana uygun ilerleyip ilerlemediğinin değerlendirilmesi gibi yöntemlerle bu sorunu azaltmaya yönelik bilinçli çabalar gerektiğine işaret etmektedir. Ayrıca, hastaların kullanılmış plakları ve ambalajları geri dönüştürmeleri teşvik edilmelidir. Bu teşvik şeffaf plak tedavisi sunan diş hekimliği pratiğinde, kullanılmış plakların geri dönüştürülebileceği özel kutuların kurulmasıyla sağlanabilir. Teknolojik ilerlemeler, çalışma modellerini önce basmak yerine plakların doğrudan bilgisayarda tasarlanıp basılmasını mümkün kılabilir.

Veseli ve ark. (Veseli E, Veseli K, Behluli E. Recyclable aligners. Br Dent J, 2024;236(360)), Al-Hashimi'nin şeffaf plaklar ile ilişkilendirilen karbon emisyonlarına dair dile getirdiği endişeler üzerine değerlendirme yapmışlardır. Bu

tedavi yöntemi, artan popülerliğine rağmen, petrolden türetilmiş termoplastik hidrokarbonların kullanımı nedeniyle kayda değer bir zorluk teşkil etmektedir. Bu maddeler, yakıldıklarında çevre üzerinde zararlı etkilere sahip olup ayrışmayan yapıları nedeniyle tıbbi atık olarak sınıflandırıldıklarından geleneksel geri dönüşüm yöntemleri için uygun değildir. İklim değişikliği, ilerlemesinin başlangıçtaki tahminleri aşabileceği konusunda uzmanların uyardığı global bir endişe kaynağıdır. Bu nedenle direkt alignerların yaygınlaşması çevresel kaygılar kapsamında da büyük bir önem taşımaktadır.

2.4. Şeffaf Plakların Üretim Süreçleri

Çeşitli firmalar vasıtasıyla sunulan şeffaf plaklar, aynı zamanda klinikte de üretilebilir. Firmanın sağladığı sistemlerin hastaya maliyeti oldukça yüksektir ve aynı zamanda üretim süreci oldukça zaman alıcıdır. Günümüzde, firmaların ürettikleri şeffaf plak sistemlerinde markalaşmanın önemi artmaktadır. Bu nedenler göz önüne alındığında, hekimler kendi kliniklerinde ürettikleri şeffaf plaklara yönelmektedir. Araştırmalar, klinikte üretilen şeffaf plakların planlanmış diş hareketlerini firmalardan satın alınan şeffaf plaklarla benzer düzeyde gerçekleştirdiğini göstermektedir (Thakkar, Benattia, Bichu, Zou, Aristizabal, & Fadia, 2023; Sachdev, Tantidhnazet, & Saengfai, 2021).

Şeffaf plakların üretimi bir dizi aşamayı içermektedir. İlk yöntemde, hastanın kayıtları A tipi silikon malzeme kullanılarak alınır ve bu ölçülerden alçı modeli oluşturulur. Ardından, model tarayıcıları kullanılarak ağız içi görüntüleri dijital formatta aktarılır. Diğer bir yöntem ise ağız içi tarayıcılarının kullanılmasıdır. Bu yöntem ölçü aşamasındaki hataları azaltırken, ağız içi tarayıcıların maliyeti nedeniyle hala modellerin dijital formata aktarımına dolaylı yollarla ihtiyaç duyulabilir. Daha sonra, bu verileri kullanarak ortodontik tedavi planları oluşturmak için tasarlanmış çeşitli yazılımlar kullanılır. Bu yazılımlar aracılığıyla oluşturulan modeller 3B yazıcılarda baskılanır ve modeller üzerine şeffaf plaklar üretilir.

2.4.1. Dijital Model Eldesi

Verilerin dijital olarak işlenebilmesi için ağız içi görüntülerin sanal ortama aktarılması gerekmektedir. Bu aktarım işlemi, ağız içi tarayıcılar veya geleneksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Aşağıda iki yöntem açıklanmaktadır: indirekt ve direkt yöntem.

İndirekt Yöntem: Ağız içi tarayıcıların maliyeti nedeniyle hala indirekt yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçü alırken oluşan distorsiyonlar, alçı dökülürken oluşan kabarcıklar ve ölçüdeki imbibisyon ve sinerezis gibi faktörler dijital modele yansır. Ayrıca bu süreç, ağız içi tarayıcılara göre daha fazla vakit almaktadır. Ağız içi tarayıcılar, diş hekimliği alanında önemli bir ilerleme sağlayarak geleneksel ölçü alma yöntemlerinin yerini almıştır. Bu tarayıcılar, hastaların ağız içi yapısını hassas bir şekilde tarayarak dijital 3B modeller oluşturmaktadır. Bu modeller, özelleştirilmiş tedavi planlaması ve apareylerin üretimi için temel verileri sağlamaktadır. Bu alanda öne çıkan ağız içi tarayıcılar arasında şunlar bulunmaktadır:

- **Generation RED 3Shape E Tarayıcı:** 3Shape firması tarafından üretilen E4 serisi model, 2020 yılında piyasaya sürülmüştür. Dört adet 5 MP çözünürlüğünde kameraya sahiptir ve modelleri ile artikülatörleri tarayabilir. 4 µm doğruluk oranıyla yüksek hassasiyetli tarama yapabilme yeteneği vardır. Alçı modelini 17 saniyede, ölçüyü ise 25 saniyede tarayabilir. Mavi LED teknolojisi ile veri toplama sağlanmaktadır. Ayrıca, ölçü taramasının yanı sıra model taramasını da gerçekleştirebilir.

- **Maestro MDS500 Tarayıcı:** AGE Solutions firmasının ürettiği bu tarayıcı, 8 µm doğruluk oranına sahip ve iki adet 5 MP çözünürlüğündeki kamera içermektedir. LED teknolojisi ile veri toplama sağlar. Ölçü ve dental model taraması yeteneklerine sahiptir.

- **7 Serisi Model & Ölçü Tarayıcı:** Dental Wings firmasının ürettiği bu model, 15 µm doğruluk oranına sahiptir. Bir adet lazer, iki adet yüksek çözünürlüklü

kamera ve bir adet renkli video kameradan oluşan optik sistemi bulunmaktadır. Ölçü ve dental alçı model taraması yeteneklerine sahiptir.

- **Foshion 3D Dental Tarayıcı:** Foshion firması tarafından üretilen bu tarayıcı, 10 µm doğrulukla tarama yapabilen iki adet 1.3 megapiksel kamera ile donatılmıştır. Tek bir çene 6 saniyede taranabilirken, ölçü taraması 50 saniyede tamamlanır.

Ağız içi tarayıcılar, diş hekimlerine daha hızlı, doğru ve etkili bir şekilde tedavi planlaması yapma imkanı sunmaktadır. Dijital verilerin kullanımı, özelleştirilmiş tedavi çözümleri üretme, hastaların konforunu artırma ve tedavi süreçlerini optimize etme konularında büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu gelişmeler, diş hekimliği uygulamalarında teknolojik dönüşümün önemli bir örneğini oluşturmaktadır.

Direkt Yöntem: Ağız içi tarayıcılar, geleneksel ölçü alma yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen teknolojilerdir ve ağız içi yapıların dijital olarak taranmasını sağlar. Bu tarayıcılar aracılığıyla elde edilen dijital modeller, özelleştirilmiş tedavi planlaması ve tedaviye yönelik apareylerin üretimi için kullanılmaktadır. Bu alandaki farklı ağız içi tarayıcılar aşağıdaki gibidir:

- **3Shape Trios Serisi:** 3Shape firması tarafından üretilen Trios serisi ağız içi tarayıcılar, hızlı ve hassas ağız içi tarama imkanı sunar. Bu tarayıcılar çürük tespiti ve diş rengi analizi gibi ek özelliklere sahiptir. Kablolu ve kablosuz seçenekleri bulunmaktadır. Taranan veriler .stl formatında bilgisayara aktarılır.

- **iTero Tarayıcı:** Align Technology firması tarafından üretilen iTero tarayıcı, yüksek çözünürlüklü tarama yapabilme özelliği ile restoratif ve ortodonti alanlarında kullanılır. iTero Element serisi ile ayrıca kızılötesi ışık kullanılarak proksimal bölgede çürük teşhisi de yapılabilmektedir.

- **Planscan Ağız İçi Tarayıcı:** Planmeca tarafından üretilen Planscan tarayıcının farklı boyutlarda iki versiyonu bulunur. Küçük boyutlu başlık, çocuk hastalarda kullanım için tasarlanmıştır. Bu tarayıcı triangulasyon tekniği kullanarak

gerçek renkli görüntüler elde eder ve veriler Planmeca Romexis Cloud tabanında kaydedilir.

- **Virtuo Vivo Ağız İçi Tarayıcı:** Dentalwings firması tarafından üretilen Virtuo Vivo tarayıcı, multiscan görüntüleme tekniği ile çalışır ve hassas tarama imkanı sunar.

- **Cerec Omnicam Tarayıcı:** Sirona firması tarafından üretilen Cerec Omnicam tarayıcı, 3B tarama yetenekleri ile hassas sonuçlar elde eder. Özel yazılımı sayesinde ortodontik tedavi planlaması yapılabilir.

Ağız içi tarayıcılar, ölçü alma süreçlerini daha hızlı, konforlu ve doğru hale getirerek diş hekimliği uygulamalarında önemli bir yer edinmektedir. Bu tarayıcılar, dijital verilerin kullanımıyla tedavi planlamasını optimize etme ve hastalar için daha iyi sonuçlar elde etme fırsatı sunmaktadır.

2.4.2. 3B Diş Hareketi Planlama Yazılımları

Ağız içi tarayıcılar tarafından sağlanan dijital veriler, 3B diş hareketi planlama yazılımlarına entegre edilerek, özelleştirilmiş diş hareketi planlamaları oluşturulmaktadır. Bu yazılımlar sayesinde diş hekimleri, hastaların tedavi süreçlerini daha ayrıntılı ve etkili bir şekilde planlayabilmektedir. Planlanan diş hareketleri, adım adım modellemelere aktarılarak sanal bir tedavi seyri oluşturulmaktadır. Sonrasında, bu dijital modeller 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak fiziksel modellere dönüştürülebilmektedir. Ortodonti uygulamalarına özel olarak tasarlanmış yazılımlardan bazıları şunlardır:

- **Maestro Ortho Studio:** Maestro Ortho Studio yazılımı, ortodontik tedavi planlamalarını yönetmek ve optimize etmek için kullanılır. Diş hareketi simülasyonları, çeşitli tedavi seçeneklerini değerlendirme imkanı ve hastalar için interaktif tedavi planları oluşturma yetenekleri sunar.

- **3Shape Ortho:** 3Shape firması tarafından geliştirilen bu yazılım, diş hekimlerine dijital ortamda hastaların diş yapısını analiz etme ve tedavi planları

oluşturma imkanı sağlar. Diş hareketi simülasyonları, sonuçları önceden görmeye yardımcı olur.

- **ClinCheck:** Align Technology firması tarafından geliştirilen ClinCheck yazılımı, Invisalign tedavi planlamaları için kullanılır. Bu yazılım, diş hekimlerine hastaların tedavi seyrini sanal olarak görselleştirme ve ayarlama fırsatı sunar. Tedavi ilerlemesi izlenebilir ve gerektiğinde planlar revize edilebilir.

- **Exceed Ortho:** Exceed Ortho, ortodontik tedavi planlaması ve simülasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Diş hekimleri, bu yazılım sayesinde hastaların mevcut durumlarını değerlendirerek, gelecekteki sonuçları önceden görebilir ve tedavi planlarını buna göre oluşturabilir.

2.4.3. 3B Yazıcıların Kullanımı

Diş hareketi planlaması tamamlandıktan sonra, modellerin 3B yazıcıda üretim için hazır hale getirilmesi için bazı ayarlamalar yapılması gereklidir. Modeller, yazıcıda işlenebilen formatlardan biri olan Standart Triangle Language ".stl" formatında alınmaktadır. Üretim sırasında, hem maliyeti düşürmek hem de çevre üzerindeki etkiyi minimize etmek amacıyla reçine materyalinin en az düzeyde kullanılması hedeflenir. Bu amaçla, modellerin tabanları tamamen dolu olarak üretilebileceği gibi, boşluklu bir yapıda da üretim gerçekleştirilebilir. Yapılan araştırmalar, 2 mm kalınlığındaki boşluklu model üretimi ile tam dolu model üretimi arasında doğruluk açısından anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir (Rungrojwittayakul, Kan, Shiozaki, Swamidass, Goodacre, & Goodacre, 2020; Sherman, Kadıoğlu, Currier, Kierl, & Li, 2020). Aynı şekilde, diğer çalışmalarda boşluklu ve boşluksuz modellerin yüzey kalitesi açısından da bir fark göstermediği ortaya konmuştur (Arnold, Monsees, Hey, & Schweyen, 2019).

3B yazıcılar, dijital ortamda tasarlanmış nesnelerin katman katman eklemeler yaparak üretilmesini sağlayan bir teknolojidir. 3B yazıcılar, ilk olarak 1986 yılında Charles Hull tarafından geliştirilen bir patent ile ortaya çıkmıştır. Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM), 3B yazıcıları sınıflandırırken 7

farklı kategoriye ayırmıştır. Bu kategoriler ve detayları aşağıda verilmiştir (Kamran & Saxena, 2016):

a. Materyal Püskürtme: Likit fotopolimer materyalleri çoklu başlıklar yardımıyla püskürterek üretim yapar. UV ışığı ile polimerizasyon sağlanır. Özellikle doku mühendisliğinde kullanılır ve iskelet yapısı olmadan üretim sağlayabilir. Diş hekimliğinde model üretiminde kullanılabilir. Doğruluk açısından diğer yazıcılara göre üstün bir performans sergileyebilir (Lee, Sing, Zhou, & Yeong, 2018).

b. Kazan Fotopolimerizasyonu: Sıvı reçine malzemesinin lazer veya projektör ışığı ile katman katman polimerize edilmesiyle üretim yapar. DLP, SLA ve CLIP yazıcılar bu kategoriye dahil edilir. DLP yazıcılar hızlı ve yüksek kaliteli üretim sağlayabilir. SLA yazıcılar, özellikle diş hekimliğinde yaygın olarak tercih edilir ve model, şeffaf plak, splint, protez ve rehber plak üretiminde kullanılabilir.

c. Materyal Ekstrüzyonu: Ekonomik üretim yapabilen bu yazıcılar, kompleks geometriye sahip ürünlerin üretiminde kullanılır. Ancak üretilen materyaller kırılgan olabilir ve düşük detay oranına sahip olabilir. Genellikle model üretiminde kullanılırlar.

d. Binder Jetting (Bağlayıcı Püskürtme): Toz malzemelerin likit bağlayıcı ajana seçici olarak depolandığı bir üretim sürecidir. Farklı malzemelerle üretim yapabilirler ve metal ve seramik üretimlerde yüksek kalite sağlayabilirler.

e. Powder Bed Fusion (Toz Yatak Füzyonu): Toz materyalden lazer veya ışınlarla üretim yapar. Metal, seramik, kompozit ve polimer malzemelerle üretim sağlayabilir. Katman katman üretim yöntemiyle çalışır.

f. Sheet Lamination (Sac Laminasyonu): Malzeme tabakalarını keserek ve birleştirerek üretim yapar. Farklı malzemelerle üretim yapabilirler.

g. Direkt Enerji Depolama: Termal enerji kullanarak malzemeleri birleştirir ve odaklanmış bir şekilde üretim yapar.

Bu farklı kategoriler, 3B yazıcıların farklı alanlarda ve ihtiyaçlara yönelik çeşitli üretim yöntemleri sunduğunu göstermektedir (Gibson, Rosen, Stucker, Khorasani, Rosen, & Stucker, 2021).

3B yazıcılarda üretilen modellerin gerçek materyal özelliklerini yansıtabilmesi için üretim sonrası polimerizasyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Polimerizasyon, farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. UV ışık kullanarak gerçekleştirilen polimerizasyon işlemi genellikle 15 dakika önerilir. Ancak bu sürenin materyali yalnızca %78 oranında polimerize ettiği belirtilmektedir. Polimerizasyon süresi 30 dakikaya çıkarıldığında ise materyalin yalnızca %80'e kadar polimerize olduğu gözlemlenmiştir. 3B yazıcılarla üretilen biyouyumlu reçinelerin geniş bir uygulama alanına sahip olması, materyallerin artık monomer oranını azaltarak biyouyumluluğunu artırma amacını taşımaktadır. Polimerizasyon derecesini artırmak için N_2 gazı ile kürleme gerçekleştiren bir cihaz geliştirilmiştir. Bu cihazın kullanımıyla daha kısa sürede ve daha etkin bir polimerizasyon sağlanması hedeflenmektedir. Wada ve arkadaşları (Wada, Wada, Gibreel, Wakabayashi, Iwamoto, & Vallittu, 2022), yumuşak okluzal splint materyali üzerinde yaptıkları çalışmada, N_2 ile kürleme yapıldığında materyalin mekanik özelliklerinin özellikle %10-20 oranında iyileştiğini belirtmişlerdir.

2.5. 3B Baskı ve 3B Yazıcılar

Üç boyutlu yazıcılar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerini kullanarak üç boyutlu nesneleri katman katman oluşturan cihazlar olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji, farklı endüstri alanlarında devrim yaratarak tasarım ve üretim süreçlerini kökten değiştirmiştir. Grafyher olarak da bilinen üç boyutlu yazıcıların tarihçesi oldukça köklüdür. İlk adımlar 1980'lerin ortalarında atılmıştır. Charles Hull tarafından 1986 yılında geliştirilen stereolitografi (SLA) yöntemi, 3B yazıcı teknolojisinin temellerini atmıştır. SLA, katman katman nesne oluşturma fikrini hayata geçiren ilk yöntemdir. Bu gelişme, üretimde önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilir ve günümüzde yaygın olarak kullanılan 3B yazıcı teknolojilerinin temelini oluşturmuştur.

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), üç boyutlu yazıcıların üretim tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, lazer ışınları kullanılarak toz malzemesi tabakalar halinde sinterlenir ve nesne katman katman oluşturulur. Özellikle metal, seramik ve polimer gibi malzemelerin kullanıldığı bu teknoloji, kompleks geometrili ve yüksek dayanıklılık gerektiren ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Fused Deposition Modeling (FDM), üç boyutlu yazıcıların bir diğer önemli teknolojisidir. Bu yöntemde termoplastik malzeme filamentleri bir nozuldan geçirilerek ısıtılır ve katman katman nesne oluşturulur. FDM teknolojisi, kullanımının kolay olması ve geniş malzeme seçenekleri sunması nedeniyle ev kullanıcılarından endüstriyel üreticilere kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Üç boyutlu yazıcıların kullanım alanları oldukça geniştir. Endüstriyel tasarım, prototip üretimi, sağlık sektörü, otomotiv endüstrisi, havacılık, eğitim ve sanat gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ürün prototiplerinin hızlı ve maliyet etkili bir şekilde üretilmesi, özelleştirilmiş tıbbi implantların üretimi, eğitim amaçlı modellerin oluşturulması gibi birçok avantajlı kullanım alanına sahiptir. 3B baskı teknolojisi, geniş bir yelpazede kullanım alanlarına sahip olan ve birçok endüstri ve sektörde yenilikçi çözümler sunan bir inovasyon olarak kabul edilmektedir. Yapılan araştırmalara göre, 3B baskı teknolojisi, ürün geliştirme süreçlerinde büyük avantajlar sağlamaktadır. Özellikle prototip üretimi, yeni ürün tasarımı ve fikirlerin hızla somutlaştırılması gibi aşamalarda, 3B baskının esnekliği ve hızı, tasarım ekiplerinin iş akışını büyük ölçüde iyileştirmektedir. Canlı doku ve organ baskısı, sağlık sektöründe devrim niteliğinde bir gelişmedir. Organ bekleyen hastalar için umut verici bir çözüm olan biyoprinting, 3B baskı teknolojisinin medikal alandaki potansiyelini göstermektedir. Canlı hücrelerin ve biyouyumlu materyallerin katman katman yerleştirilerek doku ve organların üretilebilmesi, gelecekte organ nakli sırasındaki bekleme süreçlerini kısaltabilir ve hastaların yaşam kalitesini artırabilir. 3B baskı aynı zamanda kişiye özel cerrahi cihazların tasarım ve üretiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Kişinin anatomik yapısına tam olarak uyumlu olan implantlar, protezler veya cerrahi araçlar, hastaların tedavi süreçlerini daha etkili ve konforlu hale getirebilmektedir. Özellikle yüz ve bacak protezleri, işitme yardımcıları gibi alanlarda da 3B baskı teknolojisi, bireysel ihtiyaçlara özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Hastaların vücut yapılarına uygun protezlerin üretimi, daha

iyi bir uyum ve kullanım sağlayarak yaşam kalitesini artırabilir. Diş hekimliği ve ortodonti alanlarında, dental uygulamalarda 3B baskı teknolojisi büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Clear alignerlar gibi şeffaf plaklar, diş düzeltilmesi sürecinde kullanılan ve hastaların daha rahat bir tedavi deneyimi yaşamasını sağlayan ürünlerdir. 3B baskı, bu tür özel uygulamaların hızlı ve hassas bir şekilde üretilmesini mümkün kılarak diş hekimlerinin hastalarına daha iyi hizmet sunmalarına yardımcı olur. Sonuç olarak, 3B baskı teknolojisinin geniş ve çeşitli kullanım alanları, farklı sektörlerde inovasyonu ve özelleştirilmiş çözümleri teşvik etmektedir. Ürün geliştirme, sağlık, dental uygulamalar ve protez üretimi gibi pek çok alanda, 3B baskı teknolojisinin etkileri ve avantajları gün geçtikçe daha da derinlemesine araştırılmaktadır. Bu teknolojinin gelecekteki potansiyeli, daha da büyük dönüşümlere ve ilerlemelere kapı açabilir (Sönmez, Kesen, & Dalgıç, 2018).

3B baskı teknolojisi, diş hekimliğinde oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Özellikle oral cerrahi, implantoloji, maksillofasial protez yapımı, protez ve ortodonti alanlarında bu teknoloji önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, dental uygulamaların bir parçası olarak hızlı prototipleme (RP), üç boyutlu baskı teknolojisinin önemli bir uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Hızlı prototipleme yöntemi, özellikle karmaşık anatomik yapıların gerçekçi bir şekilde üç boyutlu olarak basılması ihtiyacını karşılamak için son derece etkili bir araç olarak kabul edilmektedir (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019).

Hızlı prototipleme, tasarım ve üretim süreçlerini büyük ölçüde hızlandıran ve kolaylaştıran bir yöntemdir. Bu yöntem, diş hekimlerinin veya diş teknisyenlerinin, özellikle karmaşık ve özelleştirilmiş anatomik yapıların üç boyutlu modellerini üretmelerini sağlar. Örneğin, oral cerrahi veya implantoloji gibi alanlarda, hastanın ağız yapısına tam olarak uyumlu implant veya protez modellerinin üretilmesi gerekebilir. Hızlı prototipleme sayesinde, bu tür özelleştirilmiş modeller hızlı bir şekilde üretilebilir ve hastanın tedavi süreci daha da etkili hale getirilir. Ayrıca, hızlı prototipleme yöntemi, tasarım hatalarının erken aşamalarda tespit edilmesine ve düzeltilmesine olanak tanır. Diş hekimleri veya teknisyenleri, üretilen prototip modelleri gerçek dünya örnekleriyle karşılaştırarak tasarım hatalarını daha kolay ve etkili bir şekilde belirleyebilirler. Bu da tedavi süreçlerinin daha güvenilir ve başarılı

olmasını sağlar. Hızlı prototipleme yöntemi ayrıca zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Geleneksel yöntemlerle karmaşık anatomik yapıların üretilmesi uzun zaman alabilirken, 3B baskı teknolojisiyle hızlıca ve doğrudan üretim yapmak mümkündür. Bu da hastaların tedavi süreçlerini kısaltırken, sağlık profesyonellerinin de daha etkin bir şekilde çalışmalarına imkan tanır. Sonuç olarak, 3B baskı teknolojisinin dental uygulamalarındaki hızlı prototipleme yöntemi, diş hekimliği alanında büyük bir yenilik ve gelişme sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde özelleştirilmiş anatomik yapıların hızlı, hassas ve etkili bir şekilde üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu da hem hastaların tedavi süreçlerini iyileştirirken hem de sağlık profesyonellerinin iş akışını optimize ederken büyük avantajlar sunmaktadır (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019).

Çevre koşulları, depolama, kırılma ve insan hatalarına karşı savunmasız olan alçı modellerinin dezavantajları bu teknolojilerle geride kalmaya başlamıştır. El-Katathny ve diğerleri (El-Katatny, Masood, & Morsi, 2010), farklı insan boyut ve cinsindeki modelleri kullanmış, anatomik kopya üretimi için FDM baskıyla üretilen örneklerin üstün geometrik doğruluğa sahip olduklarını belirtmiştir. Lee ve diğerleri (Lee, et al., 2015) ise FDM ile PolyJet baskı tekniklerini kullanarak basılan dişleri değerlendirmiştir. Çalışmada basılan ve orijinal molar dişlerin yükseklikleri geometrik olarak karşılaştırılmıştır. PolyJet baskı, FDM'ye kıyasla daha başarılı tespit edilmiştir.

2.6. Şeffaf Plak Materyallerinin Direkt Üretimi

3B baskı veya katmanlı üretim olarak da bilinen teknoloji, 1980'lerden bu yana var olup, günümüzde dental ve tıbbi modelleme alanlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Oral cerrahi, protez tedavisi, restoratif diş hekimliği, ortodonti, implantoloji ve enstrüman üretimi gibi çeşitli alanlarda uygulama potansiyeli bulunmaktadır (Shivapuja, Shah, Shah, & Shah, 2019; Prasad, Kader, Sujath, & Raj, 2018). 3B baskı, yaygın üretim yöntemlerinden farklı olarak, parçaların katman katman üretilmesine imkan tanımaktadır. Mevcut 3B baskı malzemeleri arasında akrilonitril-bütadien-stiren plastik, stereolitografi malzemeleri (epoksi reçineler),

polilaktik asit, poliamid (nylon), cam elyaf dolgulu poliamid, gümüş, çelik, titanyum, fotopolimerler, balmumu ve polikarbonat bulunmaktadır (Nguyen & Jackson, 2018).



Şekil 2. 1. Direkt 3B Baskı İle Üretilmiş Şeffaf Plak *(2019)*

Şeffaf plak üretiminde 3B baskının uygulama örneklerinden biri, şeffaf plak kalıplamaları için dental modellerin 3B baskı ile üretilmesidir. 3B baskı modellerinin kullanımı, özellikle ölçü alımı sırasında (örneğin, geometrik hatalar gibi) oluşan hataların ve yanılgıların en aza indirilmesi amacıyla atılan ilk adımdır (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019). Farklı hizalama aşamalarını geliştirmek için taranmış ve modeli oluşturulmuş alçı modellerinin kullanılması yerine, dijital ölçü alımı ve 3B baskının kullanılması daha üstün sonuçlar sağlamaktadır. Doğrudan kullanım için 3B baskı ile üretilen şeffaf plak, analog ölçü alımından kaynaklanan ve ardışık termoplastik iş akışından kaynaklanan birikmiş hataları ortadan kaldırmaktadır (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019). Daha yüksek doğruluğun yanı sıra, doğrudan baskı, daha kısa tedarik zincirleri, belirgin olarak daha kısa harcanan zaman ve daha düşük maliyetler gibi diğer avantajlar da sunmaktadır. Ayrıca eksiltici ve ısıl şekillendirme süreçlerine kıyasla önemli ölçüde daha az atık üreten daha sürdürülebilir bir süreçtir (Peeters, Kiratli, & Semeijn, 2019). 3B baskı, aynı zamanda bir veya birden fazla 3B baskı işlemi kullanarak doğrudan şeffaf plakların basılması için de kullanılabilir (Shivapuja, Shah, Shah, & Shah, 2019). Farklı 3B baskı teknolojilerinin mevcut gelişmelerine ve artan kullanımına rağmen, ortodontik şeffaf plakların doğrudan 3B baskısı veya bu baskı için uygun malzemeler hakkında sınırlı sayıda yayın bulunmaktadır.

Teorik olarak, füzyonlu filament üretimi (FFF), seçici lazer sinterleme (SLS) veya eritme (SLM), stereolitografi (SLA), çoklu jet fotopolimer işlemi, HP MultiJet

Fusion teknolojisi veya sürekli sıvı arayüz üretim teknolojisi gibi çeşitli 3B baskı işlemleri doğrudan basılmış şeffaf plaklar için kullanılabilir (Shivapuja, Shah, Shah, & Shah, 2019). Şeffaf plakların özellikleri ve malzeme özellikleri ve performansı üzerindeki özel gereksinimler nedeniyle, şeffaf reçineden foto-polimerizasyonla 3B baskı seçeneklerini açıklayan bir dizi tescilli patent bulunmasına rağmen, sadece son zamanlarda yayınlanan yetersiz sayıda makale (Shivapuja, Shah, Shah, & Shah, 2019; Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019; Mohnish, 2019) 3B baskıya odaklanan ilk şirketler ve 3B baskı için malzemeler hakkında ortaya çıkmıştır.

Jindal ve diğerleri (2019) tarafından yapılan bir çalışma, Dental LT® (Long Term) şeffaf reçine (Form Labs, Somerville, MA, ABD) kullanılarak başarılı bir şekilde 3B baskı ile üretilen 0.75 mm kalınlığında bir şeffaf plak üretmiş ve mekanik ve geometrik özelliklerini Duran malzemesiyle yapılmış geleneksel olarak üretilmiş termoform plaklarla karşılaştırmıştır. Yazarlar, 3B baskı ile üretilen reçine tabanlı şeffaf diş plaklarının geometrik olarak daha doğru olduğunu, ayrıca daha düşük deplasmanlar için elastik şekilde deforme olabilen ve düşük deplasmanlarda geri dönüşümlü olarak şekil alabilen daha yüksek maksimum yük direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Jindal ve diğerleri (2020) ayrıca, LT şeffaf reçinenin, insan ısırık döngülerine eşdeğer olmayan mekanik gerilmeler altında Duran ve Durasoft (Scheu-Dental GmbH, Iserlohn, Almanya) termoplastik malzemelerle karşılaştırılabilir bulunduğunu bildirmişlerdir. Bu da 3B doğrudan baskının, klinik performansta azalma olmadan dış yüklemelere karşı yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, Dental LT reçinesi yüksek kırılma direncine sahip onaylı bir IIa sınıfı biyouyumlu malzemedir ve bu özellikleriyle gnatolojik splintler, dental retainerlar ve fonksiyonel amaçlar için doğrudan 3B baskıyla üretilen diğer sert ortodontik cihazlar için mükemmel bir adaydır. Bununla birlikte, Dental LT reçinesinin doğrudan 3B baskısıyla şeffaf plakların üretimi için uygunluğu henüz rapor edilmemiştir ve önemli bir sınırlılık, Dental LT reçinesinin performansını ve hastaların ağız ortamındaki dayanıklılığını değerlendirmek için klinik verilerin eksikliğidir (Maspero & Tartaglia, 2020).

Üç boyutlu yazıcılar ile doğrudan üretim şeffaf plaklarla ilgili olarak yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Termoform plaklarda olduğu gibi, plak kalınlığı

optimal diş hareketi ve performans elde etmek için uygulanan kuvvetin büyüklüğünü önemli ölçüde etkilemektedir. Dental plakların kalınlığını ve dolayısıyla uygulanan kuvveti yönetmek, 3B baskı alanında karmaşık bir çabadır. Edelmann ve diğerleri (2020) toplam kalınlıkta sapmalar olduğunu ve özellikle LT reçineleriyle ilgili olarak tasarım dosyasına kıyasla artan bir kalınlık bildirmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, 3B baskı iş akışının tasarlanan kalınlığı net bir şekilde gerçekleştirmediğini göstermiştir ve bu durumun şeffaf malzemenin klinik kullanımına zararlı etkiler üretebileceği belirtilmiştir.

Plaklarda boyutsal doğrulukta sapmalar, istenmeyen diş hareketine neden olabilir. Plak ile dişler arasındaki uyuma etki eden faktörlerden biri, baskı yönelimi ve baskı sonrası sertleşme süresidir. McCarty ve diğerleri (2020) 3B baskılı plak tasarımının genel boyutsal doğruluğu üzerindeki etkisinin biyouyumlu reçinelerin sertleştirilmesi gibi baskı sürecinin ilk aşamalarında da değiştirilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, Jindal ve diğerleri (2020) plakların mekanik özellikleri üzerindeki baskı sonrası koşulların etkilerini araştırmışlar, zamanın ve sıcaklığın baskı reçinesinin sıkışma yük direncinde son derece önemli olduğunu bildirmişlerdir. Doğru sertleşme süreci, nihai 3B baskılı ürün için yeterli dayanıklılık ve biyouyumluluğu sağlamak için önemlidir. Polimerin ekstra çapraz bağlanmasına izin vermek, baskılı malzemenin mekanik özelliklerini artırmaktadır.

3B baskılı malzemeler, 3B baskı öncesi son derece toksiktir ve toksisite sertleşme sonrasında giderek azalmaktadır. Toksisite seviyelerini ortadan kaldırmak için sertleştirme ve işleme, 3B baskı malzemesinin üreticisi tarafından önerildiği şekilde yapılmalıdır (Ahamed, Kumar, Vijaya, Kanna, & Indrapriya, 2020). Bir çalışmada doğrudan 3B baskılı şeffaf plakların üç farklı reçine ile sitotoksisitesi incelenmiş, üç farklı malzeme karşılaştırılmıştır (Mohnish, 2019): Accura 60® SLA (3D Systems, Rockhill, SC, ABD), Dental LT® açık reçine (Form Labs, Somerville, MA, ABD) ve Invisalign® (Align Technology, San Jose, CA, ABD). Benzer şekilde, Dental LT reçinesi ve Accura 60® SLA, doğrudan baskılı şeffaf plaklar için onaylı değildir ve bu amaçla daha önce test edilmemiş veya tanımlanmamıştır. Çalışma, Invisalign® malzemesinin en düşük sitotoksik etkisi gösterdiğini, onu Dental LT® ve Accura 60®'ın izlediğini ortaya koymuştur. Ancak, Invisalign® plakları doğrudan

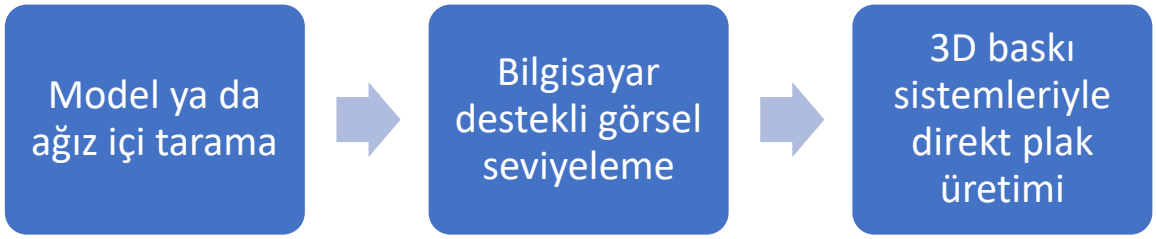
3B baskıyla üretilmemektedir. Ahamed ve diğerleri (2020) tarafından yapılan hücre canlılığına yönelik in vitro bir çalışmada, Invisalign® malzemesinin doğrudan baskılı plak malzemelerine kıyasla daha biyouyumlu olduğu ortaya konulmuştur. Sitotoksisite özellikle ilk gün daha yüksek bulunmuş ve daha sonra giderek azalmıştır. Bu sonuçlar, 3B baskılı plakların klinik olarak değerlendirilmesi için gelecek çalışmaların artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.7. Termoform ve 3D Baskı İşlemlerinin Karşılaştırılması

Şeffaf plaklar boyuta ilişkin kararsızlık, mukavemetin ve aşınma direncinin düşüklüğü gibi sınırlamalara sahiptir. Bu gibi problemler malzeme özellikleri ve üretim sürecinden kaynaklanabilmektedir. Üretim süreci elde edilen şeffaf plaklarda beklenmeyen sınırlılıklar ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Bu durum dişlere uygulanan ortodontik kuvveti etkilemektedir (Jindal P. , Juneja, Siena, Bajaj, & Breedon, 2019). Bir araştırmada geleneksel termoform işlemle üretilen şeffaf plakların boyutsal istikrarsızlık, düşük mukavemet ve aşınma direnci gibi sınırlayıcılarının olduğu ortaya konulmuştur (Ahn, Kim, & Kim, 2015). Bu durum, söz konusu sınırlılıkların ortadan kaldırılması için çeşitli arayışların ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır. 3D baskı teknolojileriyle üretilen şeffaf plaklar, geometrik ölçümler kapsamında daha etkili yöntemler sunmaktadır (Nasef, El-Beialy, & Mostafa, 2014). Yapılan araştırmalara bakıldığında, 3D üretim şeffaf plaklar ve termoform şeffaf plaklara ilişkin fizikomekanik kıyaslamanın oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Aşağıda, termoform şeffaf plaklar ve 3D üretim şeffaf plakların aşamalarına ilişkin şekiller sunulmaktadır.



Şekil 2. 2. Termoform şeffaf plakların üretim süreci



Şekil 2. 3. 3D baskı teknolojisi ile üretilen şeffaf plakların üretim süreci

Termoform şeffaf plaklarda üretim süreci kısaca aşağıdaki gibidir:

- **Kalıp ve Isıtma İşlemi:** Termoform plak üretiminde, öncelikle hastanın ağız yapısına uygun bir kalıp oluşturulur. Bu kalıp, hastanın dişlerinin düzgünce oturduğu ve istenilen hedef pozisyonu yansıtan bir şekle sahiptir.

- **Termoform Makinesi:** Daha sonra, bu kalıp, özel bir termoform makinesinde kullanılır. Plastik malzeme (genellikle polikarbonat) ısıtılır ve kalıp üzerine yerleştirilir.

- **Şekillendirme:** Isınmış plastik malzeme, kalıp üzerindeki diş şekline ve pozisyonuna uyacak şekilde vakumla veya basınçla şekillendirilir. Plak, istenilen hedef pozisyonuna göre şekil alır.

- **Kesme ve Pürüzlendirme:** Şekillendirilen plak, daha sonra gerektiğinde kesilir ve kenarları pürüzlendirilir. Bu adım, plakların hastanın ağzında daha konforlu ve rahat bir his yaratmasını sağlar.

3D baskı teknolojisinde ise süreç şu şekildedir:

- **Diğer Birçok Adımla Üretim:** 3D baskı yöntemi daha çok adımlı bir süreci içerir. Öncelikle, hasta ağzının dijital bir taraması alınır ve bu veri bilgisayara aktarılır.

- **Tasarım ve Yazılım:** Bilgisayar yazılımı, dijital tarama verilerini kullanarak plakların istenilen son pozisyonunu ve şeklini tasarlar. Bu yazılım, dişlerin hareketini simüle edebilir ve hedeflenen sonuca ulaşmak için plakların hangi aşamalarda ne kadar şekil alacağını belirler.

- **3D Baskı:** Tasarım tamamlandığında, 3D baskı cihazı kullanılarak şeffaf plaklar katman katman üretilir. Bu baskı işlemi, spesifik bir şeffaf reçine malzemesi kullanılarak gerçekleştirilir.

- **Son İşlemler:** Baskı sonrası, üretilen plaklar kesilebilir ve pürüzlendirilebilir. Ayrıca, plaklar gerektiğinde dişlerin üzerine oturacak şekilde özelleştirilebilir.

Termoform işlemiyle üretilen şeffaf plaklar daha manuel bir süreci içerirken, 3D baskı teknolojisi daha dijital ve otomatize bir yaklaşım sunar. 3D baskı, dijital tasarım ve simülasyonun birleştiği bir yöntem olduğu için daha fazla özelleştirme ve kontrol imkanı sunar. Bu yöntem sayesinde ürünlerin dijital tasarımı yapılarak özelleştirilmesi mümkün olmaktadır. Tıbbi uygulamalarda hastaların anatomik yapısına uygun ürünler geliştirmek gibi özel ihtiyaçları karşılamak için büyük bir potansiyel sağlar. Ayrıca, 3D baskı sayesinde ürün prototipleri hızlı bir şekilde üretilebilir, bu da ürün geliştirme sürecini hızlandırır ve yeni fikirlerin test edilmesini kolaylaştırır. Bu yöntem aynı zamanda karmaşık geometrilerin ve tasarımların üretilmesini sağlar, bu da geleneksel üretim yöntemlerinde zor veya maliyetli olabilecek şekilde karmaşıklığın kolayca ele alınabileceği anlamına gelir. Malzeme tasarrufu, düşük üretim maliyetleri, hafif ve optimize edilmiş tasarımlar, sürdürülebilirlik, dağıtılmış üretim ve daha az insan müdahalesi gerektiren otomatik üretim gibi avantajlar, 3D baskının birçok endüstride dönüşüm yarattığı ve daha geniş bir kullanım alanına sahip olduğu gerçeğini yansıtmaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında üç boyutlu yazıcı ile direkt üretilen plakların ve ısıyla şekillendirilerek üretilen şeffaf plakların malzeme kartları oluşturularak dinamik sonlu finite element analizi ile değerlendirilmesi planlanmıştır.

Çalışmamızda insana ait biyolojik materyal verisi kullanılmamış olup çalışma modeli meshmixerda oluşturulmuştur. Bu sebeple çalışmamızın tasarımında etik kurul izni gerekmemektedir.

3.1. Dental Model Ve Şeffaf Plak Modelinin Oluşturulması

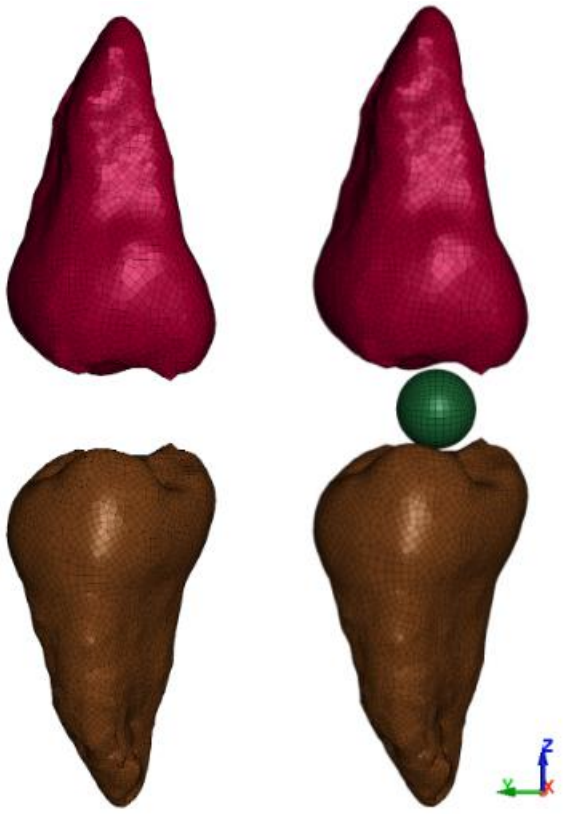
Dijital dental model .stl formatında elde edildikten sonra MESTRO 3D ORTHO STUDIO (age solutions, pontedere, italya) yazılımındaki şeffaf plak modülü üzerinde sanal şeffaf plak modeli tasarlanmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Cihaz ve Yazılımlar

Bu çalışmada LS DYNA ve ANSYS WORKBENCH Sonlu Analiz Programları kullanılarak termoplastik şekillendirilen PET-G ve direkt basılabilir TC-85 rezinin ortodontik diş tedavilerindeki etkisi araştırılacaktır. TC-85 için LS-DYNA içerisinde hazırlanmış olan malzeme kartının validasyonu için Şekil 3. 1.'de bulunan analiz senaryosu oluşturulmuştur.

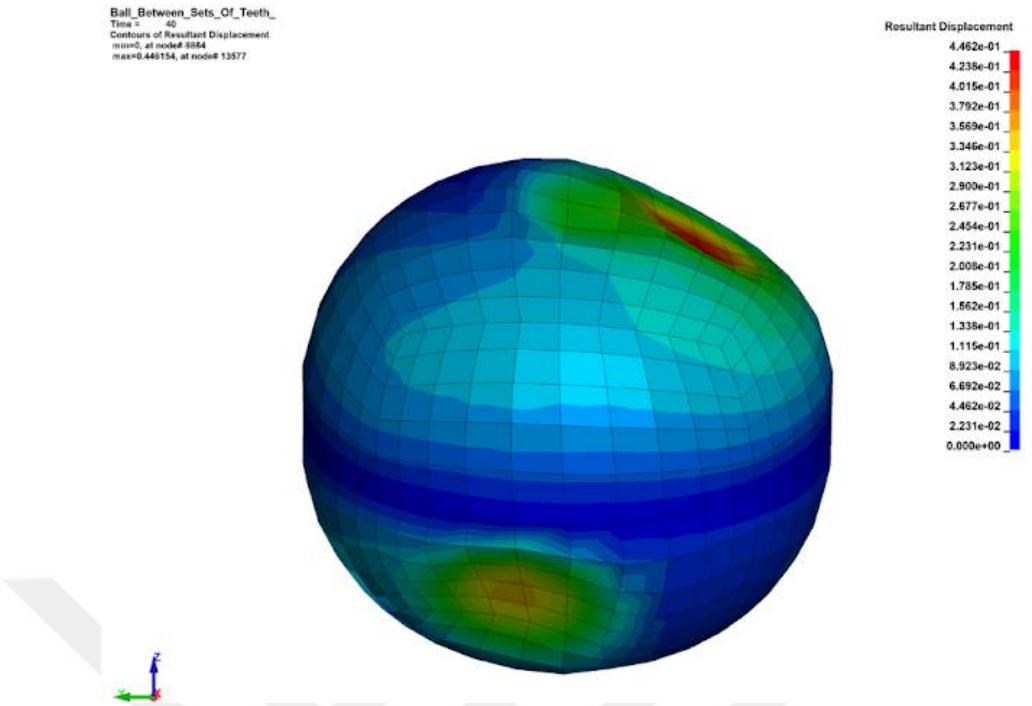
Analizde temsili iki diş geometrisi ve küresel yapıda oluşturulmuş TC-85 numune hazırlanmıştır. XYZ koordinat düzleminde iki dişin orta noktasına küresel yapı konumlandırılmıştır ve TC-85 için oluşturulan malzeme kartı numune üzerine atanmıştır. Kayma, basma ve çekme gerilmelerinin ortaya çıkması; buna bağlı olan deformasyon verisinin alınması adına diş geometrisi, küresel yapı üzerinde deformasyon oluşturmak için kullanılmıştır. Temsili diş geometrisine küresel yapının plastik deformasyona uğraması için hareket verilmiş, deformasyon sonrasında numunenin sıcaklığı oda sıcaklığından (296K/22,85C), vücut sıcaklığına (310K/36,85C) getirilerek, mekanik kuvvet altında oluşan deformasyonun başlangıç

noktasına doğru negatif deformasyonu gözlemlenmiştir. Mekanik kuvvet altında pozitif yönde deforme olan bir cismin, ısı girdisi altında ilk haline doğru negatif deformasyon göstermesi şekil hafızasından kaynaklı, küresel yapının eski haline dönme isteğinden doğmaktadır.



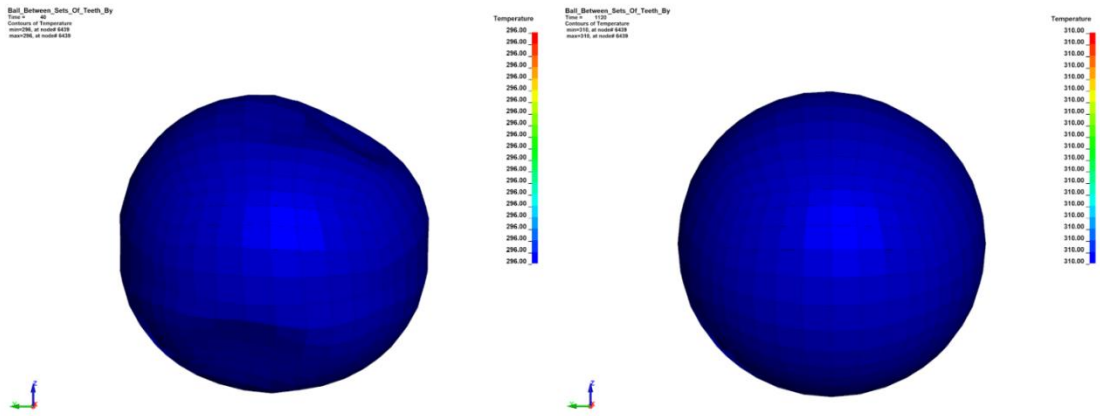
Şekil 3. 1. Küre şekli verilen TC-85 numuneye ait şekil hafızası analizi kurgusu

Kırmızı ve kahverengi; üst ve altta bulunan geometriler dişi temsil etmektedir. Yeşil küresel cisim TC-85 malzemesinin tanımlı olduğu yapıdır. İlk etapta küre şeklinde olan TC-85 numuneye temsili dişler tarafından kuvvet uygulanarak deformasyona maruz bırakılmıştır. Diş geometrisinin küresel yapı üzerinde oluşturduğu deformasyon miktarı şekil 1.2'de de görüldüğü üzere 0.4462 mm'dir. Şekil hafızasının gösterilebilmesi için bu aşamada mekanik analize termal analiz uygulanmıştır.

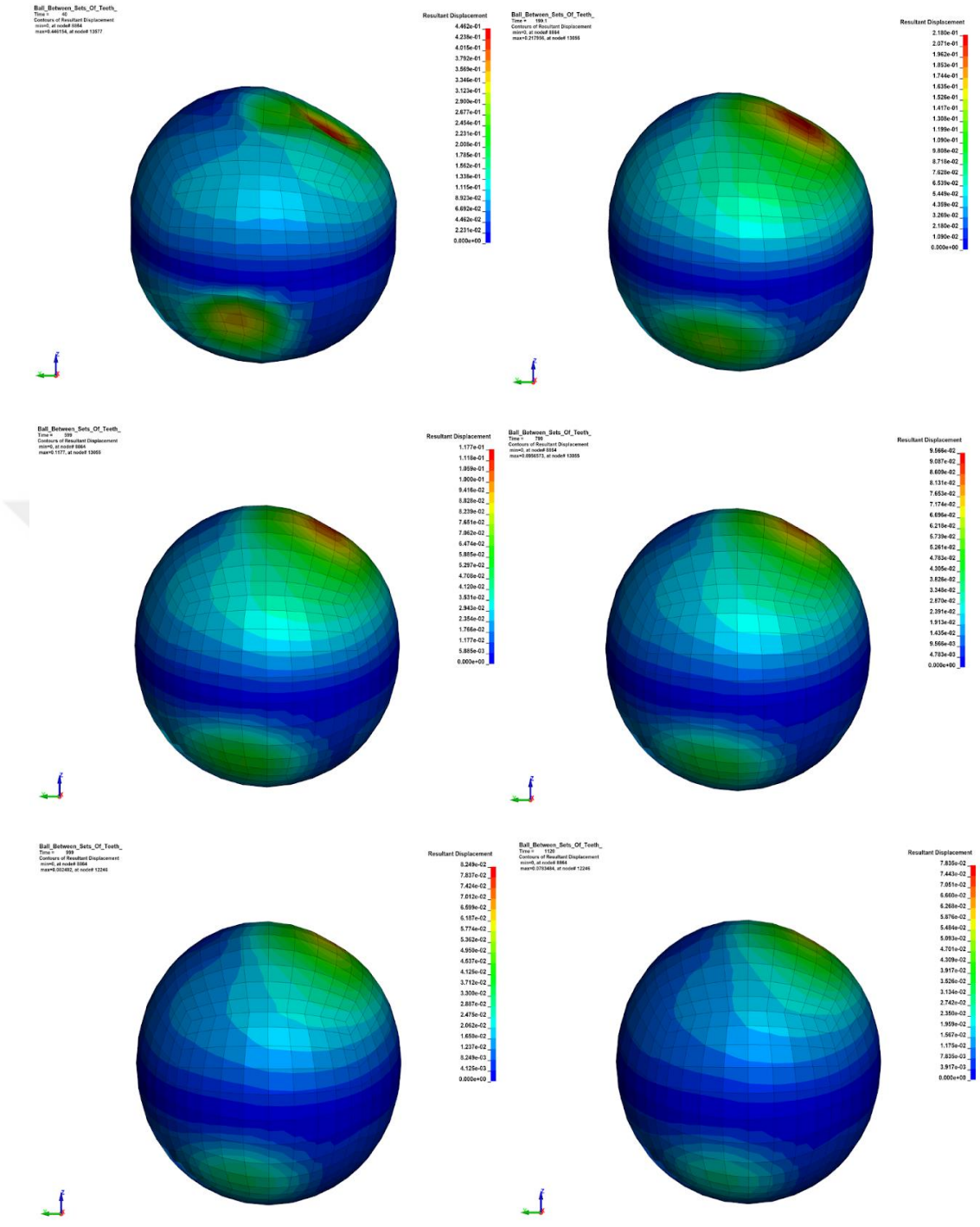


Şekil 3. 2. Mekanik Kuvvet Etkisi Altında Küre Şekli Verilen Tc 85 Numunenin Deformasyon Sonucunu Gösteren Fem Analizi

TC85 Numunenin sıcaklığının yükselmesi ile deformasyonun değişimi, LS DYNA sonlu elemanlar programı içerisinde modellenerek şekil 3.3'de gösterilmiştir. Numune termal girdi sonucunda oda sıcaklığından (296K/22,85C) vücud sıcaklığına 310K/36,85C yükseltilmiştir.Numune şekil hafızası özelliğinden dolayı eski şekline geri dönmeye çalışmıştır.Şekil 3.4'da aşamalı olarak deformasyon gelişimi paylaşılmıştır.



Şekil 3. 3. Tc 85 Numunenin Termal Analiz Başında Ve Sonundaki Sıcaklık Değerleri



Şekil 3. 4. Termal analiz sırasında deformasyon üzerindeki değişimi

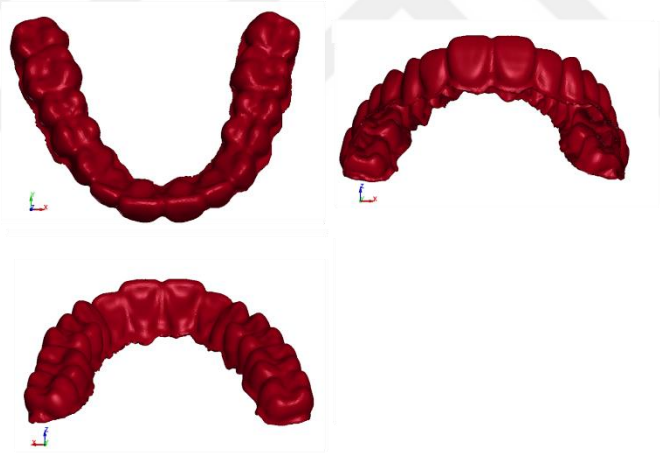
Veriler incelendiğinde (296K/22,85C) değerlerinden 310K/36,85C değerlerine doğru sıcaklık değerleri yükselirken deformasyon miktarında %82-93 oranına şekil hafızasına bağlı olarak düzelme gerçekleşmiştir. Düzelme miktarı merkez noktası üzerinde XY düzleminde %100' e ulaşırken, deformasyonun

maksimum olduğu polar noktalarda %82'ye ulaşmıştır. Literatür taramasında karşılaşılan veriler incelendiğinde TC- 85 için şekil hafıza özelliğinin düşük sıcaklıklarda da sürdüğü görülmüştür.

LS- DYNA içerisinde malzeme modeli oluşturulmuş ve simülasyon ile doğrulanmıştır. Malzeme kartının kullanılabilmesi için gerçek dişten faydalanılarak dişlik modeli oluşturulmuş. Literatür taramalarından elde edilen PET-G malzeme bilgileri ve oluşturulan TC- 85 malzeme modelinden faydalanılarak veriler dişliğe işlenmiştir. Amaç benzer şartlar altında iki malzemenin strain cinsinden davranışını gözlemlemektir.

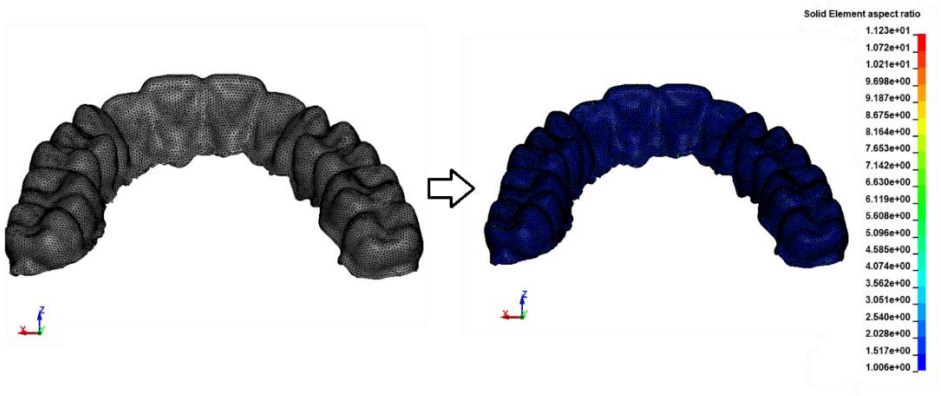
4. BULGULAR

Şekil 4.1'de analiz içerisinde kullanılan dişlik datasının 3 farklı yönden görünümü mevcuttur. Ortodonti tedavisinde plak, aşamalı yönlendirme ile dişe takıldığı andan itibaren kuvvet oluşturmaktadır. Kuvvet etkisi altında diş, damak, PDL ve damak dokusunu istenilen şartlar neticesinde kalıcı deformasyona maruz bırakmaktadır. Bir diğer deyişle dokunun ve dişliğin geometrik şekli değişmektedir. Bölüm 3 gereç ve yöntemler'de paylaşılan analizde TC 85 Şekil hafızası kartının çalıştığı doğrulanmıştır. Bölüm 4 Bulgular'da indirect bir malzeme olan PETG ile direk bir malzeme olan TC-85 den üretilen iki plağın, maximum çiğneme kuvveti 600N altında strain cinsinden deformasyon miktarları gözlemlenecek, süreç sonunda hangi malzemenin geometrik şeklini başlangıçtaki şekline göre daha fazla koruduğu tespit edilmeye çalışılacaktır.

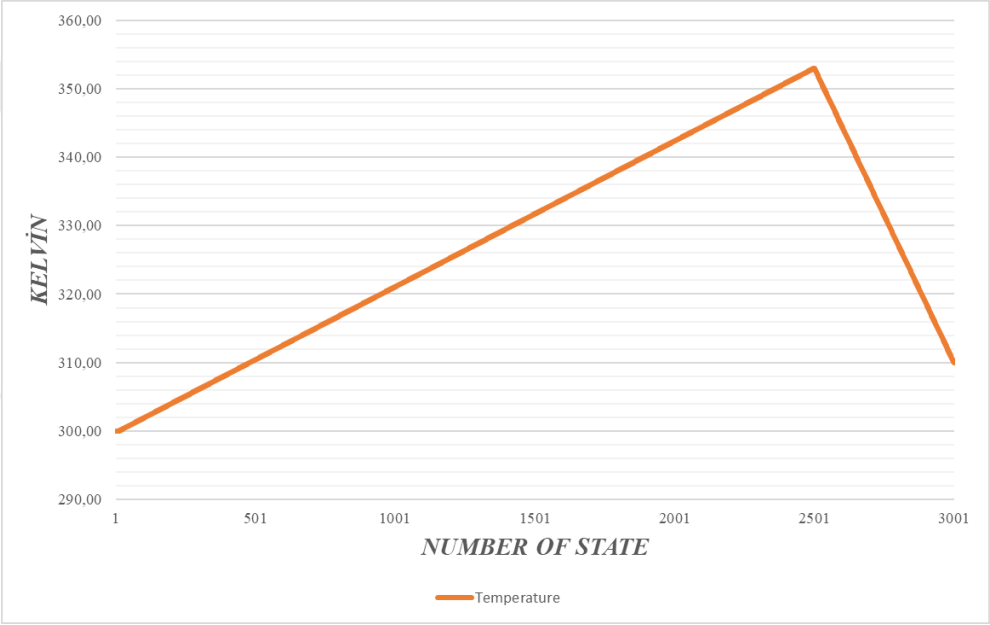


Şekil 4. 1. Tüm dişleri kapsayan şeffaf plak geometrisi

FEM analizlerinde önem taşıyan parametrelerden biri mesh kalitesidir. Mesh atma işleminde tetrahedron mesh elemanları tercih edilmiştir. Mesh kalitesinin gözlemlenmesi adına aspect ratio kriteri baz alınmıştır. Birkaç element dışında aspect ratio değerleri 10'dan küçüktür, maksimum aspect ratio değeri ise 11,23'dür. LS Dyna içerisinde malzeme kartı oluşturulurken literatürden alınan malzeme özelliklerinin yardımıyla mat_291_shape_memory_alloy kartı oluşturulmuştur

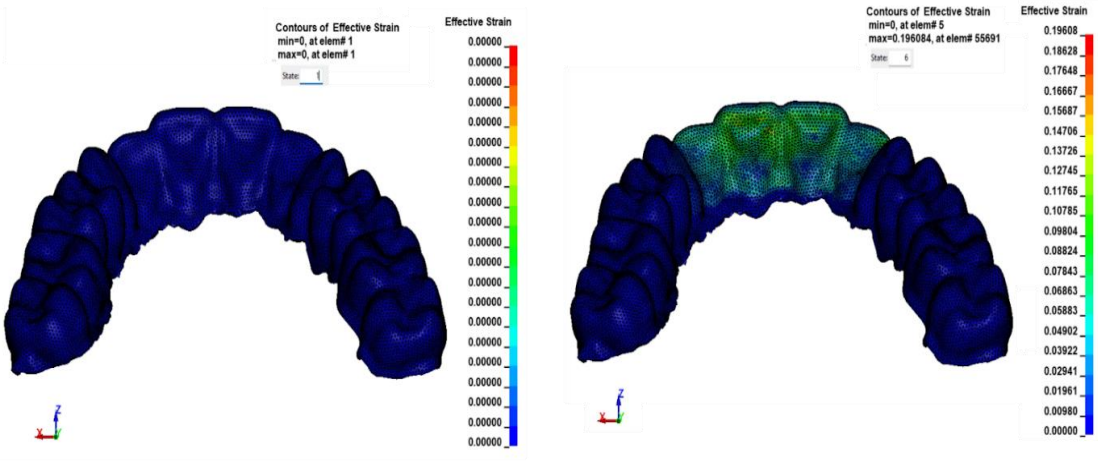


Şekil 4. 2. Clear Aligner geometrisi mesh değerlendirmesi



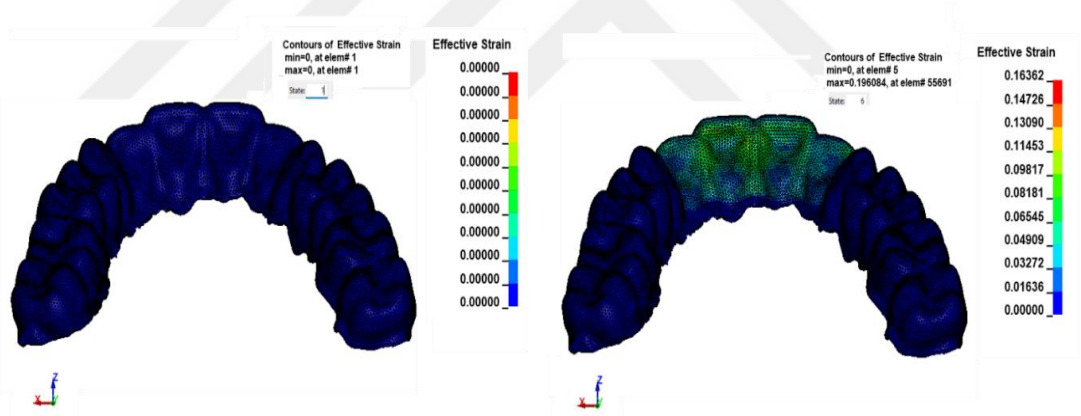
Şekil 4. 3. Sıcaklığın değişim eğrisi

Simülasyonda 300K/26,86C sıcaklıkta ön kesici dişleri üzerine 600 Newtonluk bir kuvvet uygulanmıştır. Ardından sıcaklık değeri 300K/26,86C ‘dan 352K/78,85C’ ye çıkarılmış şekil hafızasının çalışabilmesi için daha sonra 310K/36,85C ‘ye düşürülmüştür. Mekanik ve termal analiz işlemi tam olarak sonuçlandığında oluşturulan (Bu esnada mekanik kuvvet altında oluşan) deformasyon miktarındaki düzelme incelenmiştir. (ne kadar gerilediği gözlemlenmiştir.)



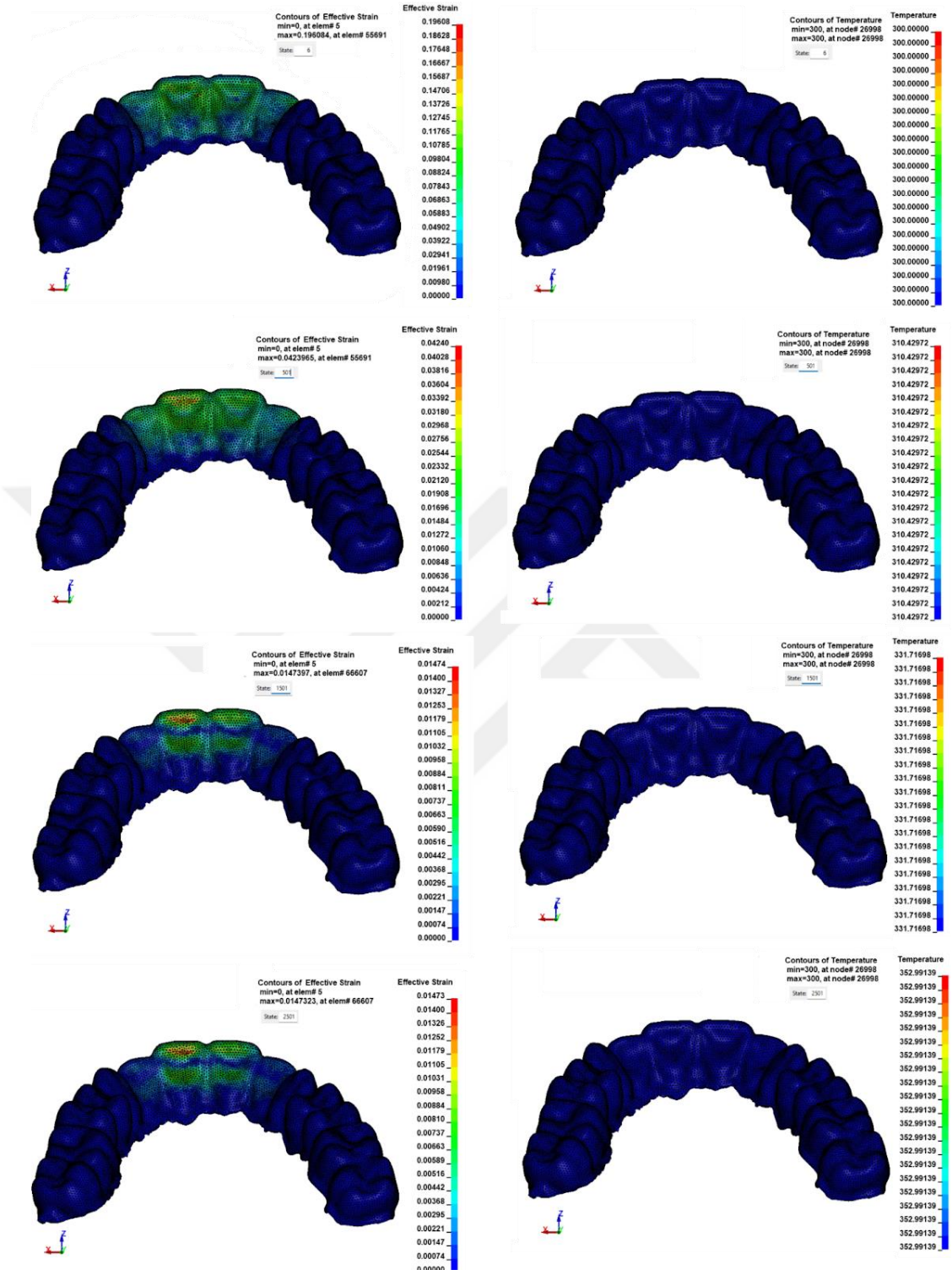
Şekil 4. 4. TC 85 için oluşturulan analizin sonuç dataları

Şekil 4.4 da gösterildiği üzere, 600 newtonluk kuvvet sonucunda maksimum strain miktarının görüldüğü anda ve bölgede/ elementte 0,19608 strain oranı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 5. PETG için oluşturulan analizin sonuç dataları

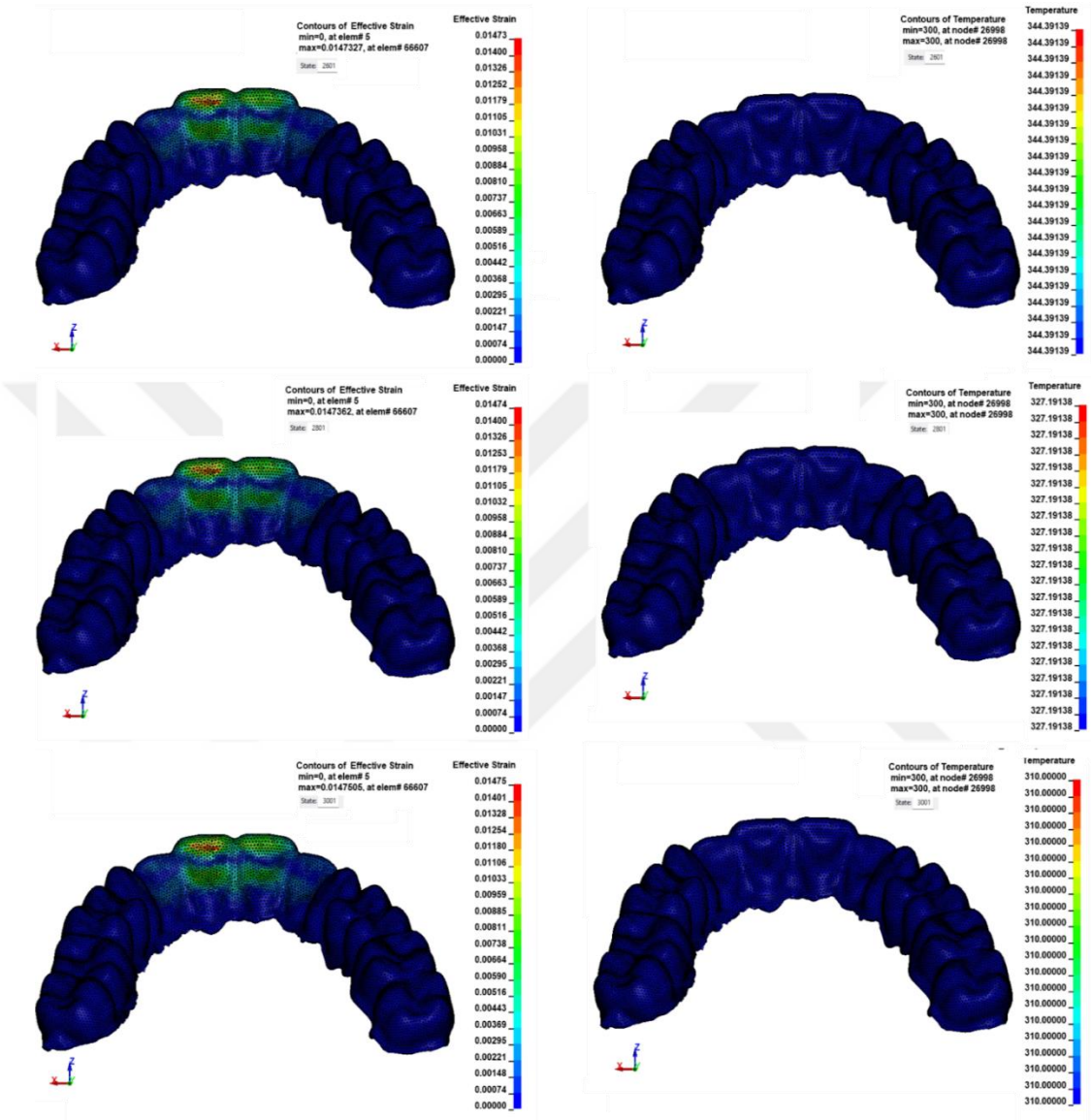
Aynı analiz PETG için tekrarlanmıştır. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi maksimum strain miktarının görüldüğü anda ve bölgede/ elementte 0,16362 strain oranı gözlemlenmiştir. Bu oran TC 85 den daha düşük olup, sadece mekanik kuvvet altında PETG'nin TC 85'e göre daha rijid kaldığını göstermektedir.



Şekil 4. 6. 300K/26,86C'den 352K/78,85C'e Sıcaklığı Artırılan TC 85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri

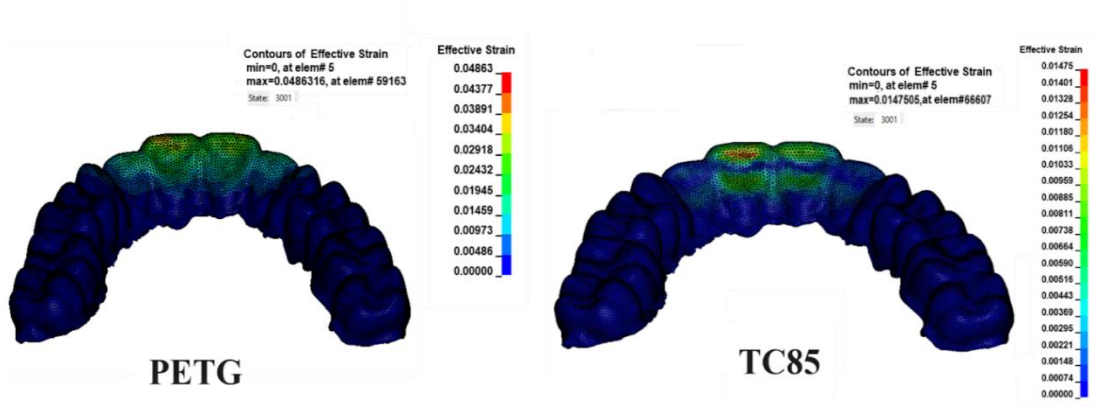
Şekil 4.6 incelendiğinde TC 85 numune üzerinde sıcaklık artışı ile beraber deformasyonun azaldığı gözlemlenebilir. 300K/26,86C sıcaklıkta maksimum strain

miktarının görüldüğü element de 0,19608 olan strain oranı, sıcaklığın kademeli bir şekilde artışı ile birlikte 352K/78,85C'e ulaştığında 0,01473'e düşmüştür. Bu veri sıcaklık artışı ile birlikte strain oranının %92,49 olarak gerilediğini gösterir.



Şekil 4. 7. 352K/78,85C den 310K/36,85C'e Sıcaklığı Azalan TC 85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri

Şekil 4.7 incelendiğinde TC85 numunenin 352K/78,85C den 310K/36,85C'e düşerken %92,49 geri dönme oranını koruduğu söylenebilir. Sıcaklığa bağlı malzemenin genleşmesinden ve sertleşmesinden meydana gelen şekil değişimi analizlerde ihmal edilmiş, mekanik kuvvetin ve ısıl girdinin malzeme üzerinde oluşturduğu etki üzerinde durulmuştur.

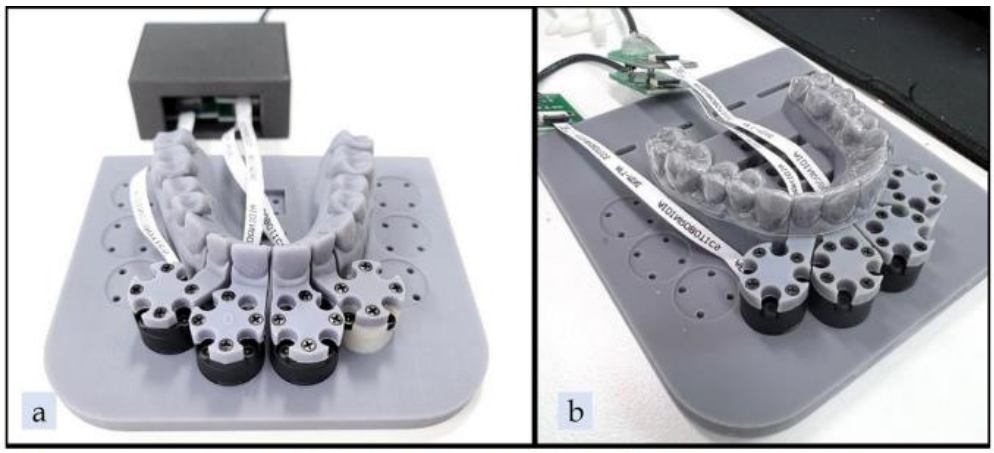


Şekil 4. 8. PET-G/ TC85 Numuneye ait Sıcak-Strain Verileri

Analiz sürecinin sonunda PetG Malzeme üzerine gelen 600 Newtonluk kuvvetin malzeme üzerindeki titreşim/Şok etkisinin ve rezilyans değerinin de etkisiyle maksimum deformasyon olan bölgede strain değeri 0,04863 olarak gözlemlenmiştir. Analiz sürecinin sonunda titreşim/Şok etkisinin rezilyansın ve major olarak ısıl girdinin de etkisiyle TC85 malzemede maksimum deformasyon olan bölgede strain değeri 0,01475 olarak tespit edilmiştir. Bu veri ışığında TC 85 in ısıl girdi altında geometrisini daha iyi koruduğu yorumu yapılabilir. Buna atfen plağın dişe aktarmış olduğu toplam kuvvetin, dişte istenilen bölgeye aktarılan kuvvete oranını düşünüldüğünde TC85'in ilk geometrik yapısını koruduğundan dolayı daha yüksek oranda istenilen bölgeye kuvvet aktaracağı düşünülmektedir. Fakat kuvvetlerin büyüklüğü plağın malzeme yapısına plak malzemesinin rijidliğine doğrudan bağlıdır. Ve Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde PetG malzemenin daha Rijid bir yapıda olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında Kuvveti isabeti noktasında TC85 in kuvvetin büyüklüğü noktasında PetG nin daha verimli olduğu söylenebilir. Malzemelerin malzeme karakterizasyonlarının süreç içerisinde nasıl değişeceğide ayrı bir inceleme konusu olarak incelenebilir.

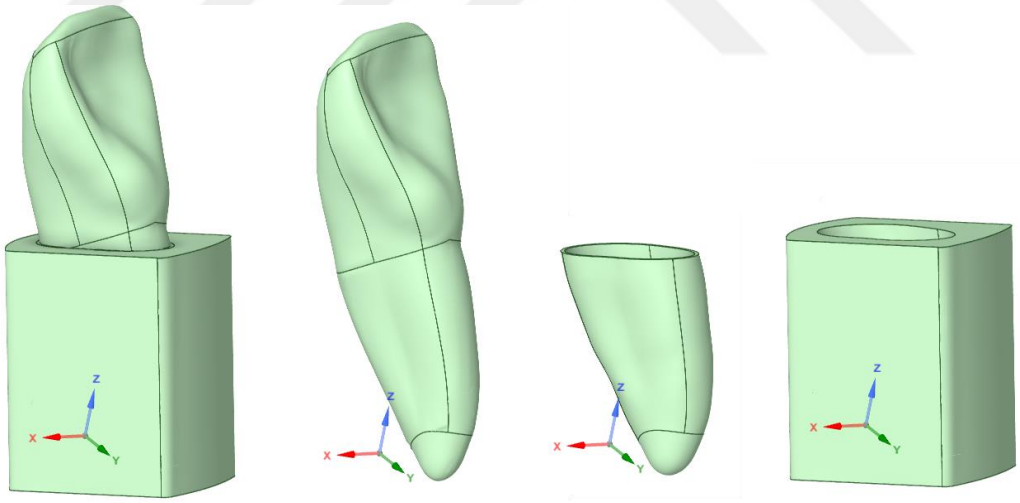
Abraham McKay ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada PetG ve Tc85 malzemelerden yapılmış olan dişlikler 3D printer ile basılmıştır. Daha sonrasında deney düzeneğine takılmış ve dişliklerin dişe aktarmış olduğu kuvvetler nümerik olarak belirlenmiştir. Bu kuvvetlerin santral dişe uygulandığında diş ve PDL

üzerinde oluşan stress değerlerinin, bu değerlerin yoğunlaşma noktalarının tespiti için Ansys Workbench programı kullanılmıştır.



and moment sensor apparatus, **b** Aligner seated on 3-axis force and moment sensor apparatus

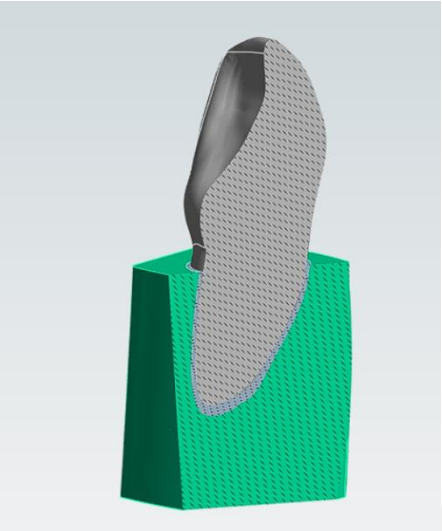
Şekil 4. 9. Abraham McKay ve arkadaşlarının (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) oluşturmuş olduğu deney düzeneği.



Şekil 4. 10. Sırasıyla Analiz içerisinde kullanılan montaj geometrisi, santral diş, PDL, kemik dokusu

Geometriye bağlı olarak verilebilecek datalar aşağıda paylaşılmıştır. Datalar içerisinde tablo 3.1'de diş, pdl ve kemik dokusu için mekanik özellikler paylaşılmıştır. Diş geometrisinin hacmi 6,7294e+006 mm³PDL geometrisinin hacmi

4,6874e+005 mm³,kemik geometrisinin hacmi 1,1552e+007mm³'dir.

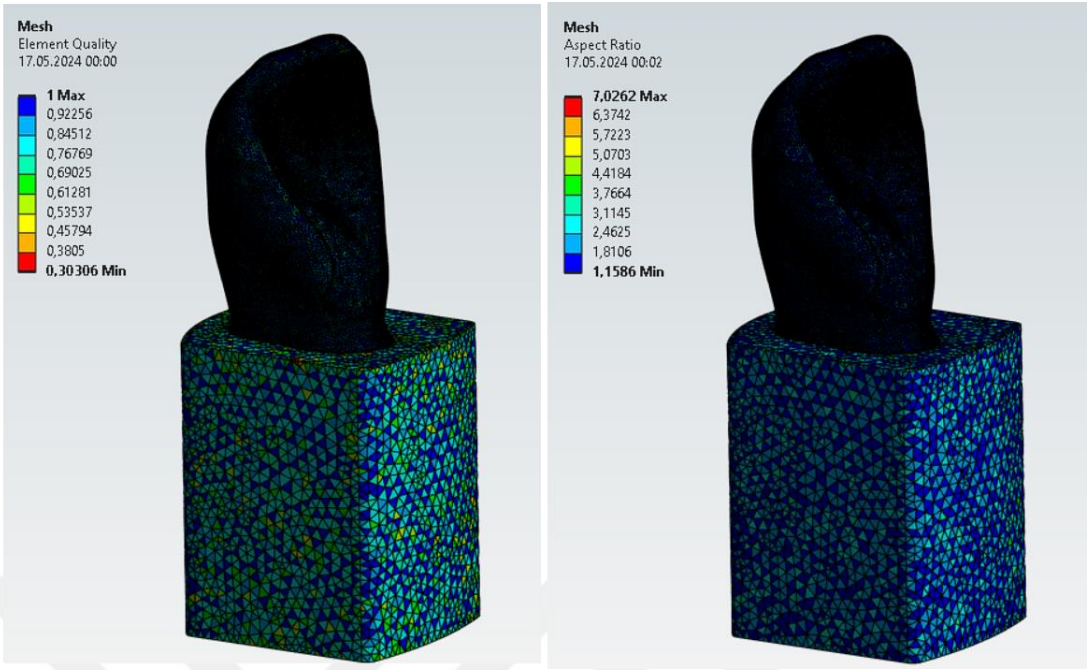


Şekil 4. 11. 11 Nolu Santral Dişe Ait Simülasyonda Kullanılan Full Body Kesit Görünüşü

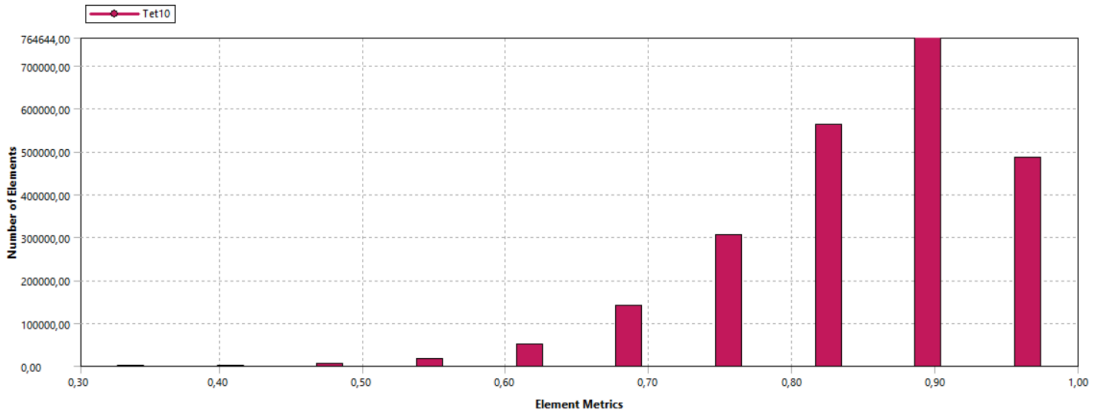
Çizelge 4. 1. Malzemelerin Elastik Malzeme Özellikleri (46,47,48)

Malzeme Özellikleri	PDL	KEMİK	DİŞ
Young's Modulus (Mpa)	1400	13800	84090
Poisson's Ratio	0,45	0,26	0,2

Analiz içerisinde mesh kalitesinin artırılması alınan verilerin doğruluğa yaklaşmasını sağlamaktadır. Bu amaçla meshleme hassas olarak yapılmıştır. Analiz içerisinde. 163420 adet element ve 274737 adet node PDL için, 2130583 adet element ve 2908514 adet node diş için kullanılmıştır. Toplamda bütün geometriler dikkate alındığında 2325305 element, ve 3233324 node kullanlmştır Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde mesh kalitesi hakkında fikir sahibi olmak mümkündür.



Şekil 4. 12. Aspect Ratio ve Element Quality Değerleri



Şekil 4. 13. Aspect Ratio ve Element Quality Değerleri

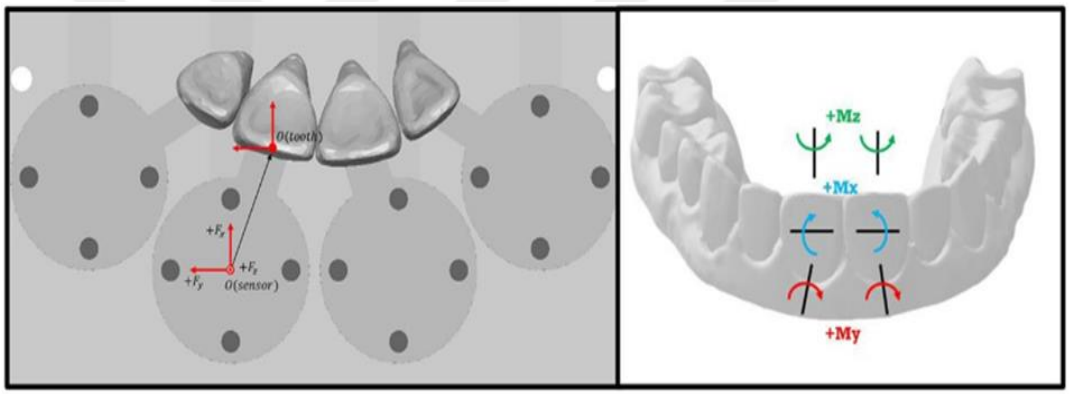
Yapılan ön analizler neticesinde elde edilen veriler ışığında diş kronuna yakın kısımda stress değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olara PDL geometrisinde krona yakın kısımda mesh sıklığı artırılarak heterojen bir mesh yapısı kullanılmıştır.

Santral diş üzerine TC-85 ve PET-G'nin uygulanmış kuvvet ve moment değerleri McKay ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmaya atfen Tablo 4.2'de

paylaşılmıştır. Şekil 4.14'de ise lokal koordinat sistemine göre kuvvet ve momentlerin uygulanma yerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. TC-85'in ve PetG'nin dişe uyguladığı kuvvet ve moment değerleri

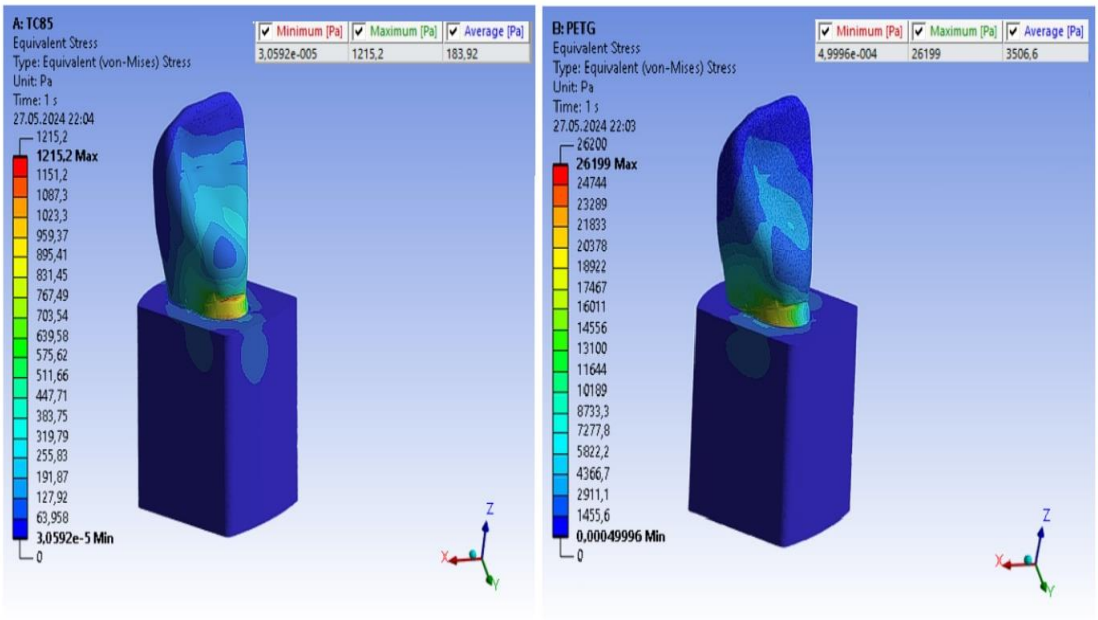
		PETG	TC85	Unit
Lingual force	Fx	10,2	1,4	N
Distal force	Fy	-25,22	-0,67	N
Extrusive force	Fz	0,94	0,41	N
Lingual inclination	Mx	54,99	6,98	Nmm
Mesial crown angulation	My	-130,83	4,68	Nmm
Mesial rotation	Mz	-29,12	-14,04	Nmm



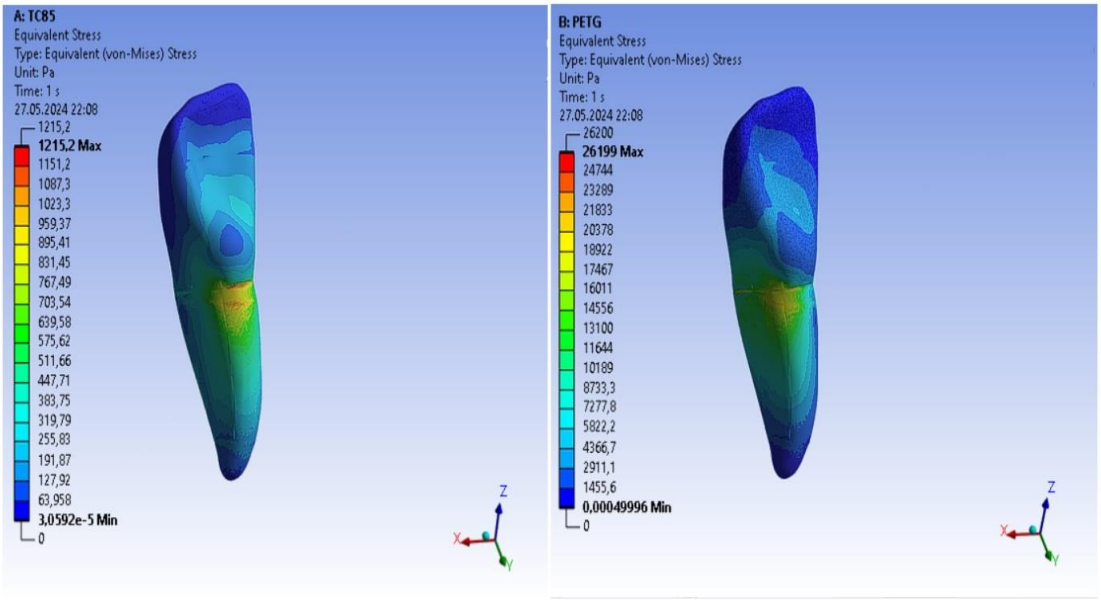
Şekil 4. 14. TC-85'in ve PET-G'nin santral dişe uyguladığı kuvvet ve momentlerin kartezyen koordinat sisteminde gösterilmesi

Analiz içerisinde geometriler arasında bonded kontak tipi kullanılmıştır. Analitik değerler, PDL geometrisi, doku kalınlığı, plağın sonlu elemanlar modelinde yapılan kabuller/basitleştirmeler, mesh eleman boyutu, mesh eleman sayısı, eleman tipi, kontak tipi, kuvvetin uygulanma yüzeyi, kemiğin sabitlendiği yüzey gibi birçok parametreye bağlı olup gerçekte farklı sonuçlar gösterebilir. Fakat yapılan kabuller/basitleştirmeler hassaslaştırıldıkça gerçek fiziksel modele nümerik olarak yakınlaşma artırılabilir. Yapılan simülasyon neticesinde, simülasyon sonuçlarından alınan datalar değerlendirildiğinde Şekil 4.15'in incelenmesi ile de fark edileceği üzere Diş, DPL ve kemik üzerinde oluşan ortalama gerilme TC85'den üretilen bir

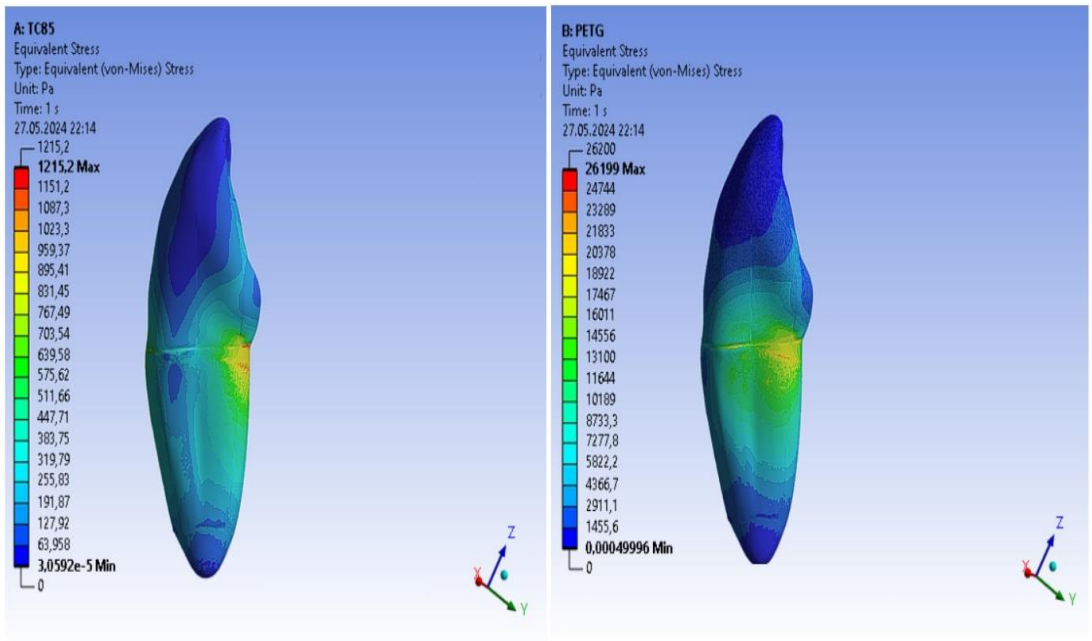
plak kullanıldığında 182,92Pa, PetG'den yapılan bir plak kullanıldığında ise 3506,6Pa dır. Geometri üzerinde maksimum gerilme TC-85ten üretilen plakta 1215,2Pa olarak, PetG'den üretilen plakta 3506,6 Pa olarak diş üstünde tespit edilmiştir. Bu veri ışığında, mimimum gerilme kemik yapısında gözlemlenmiştir.



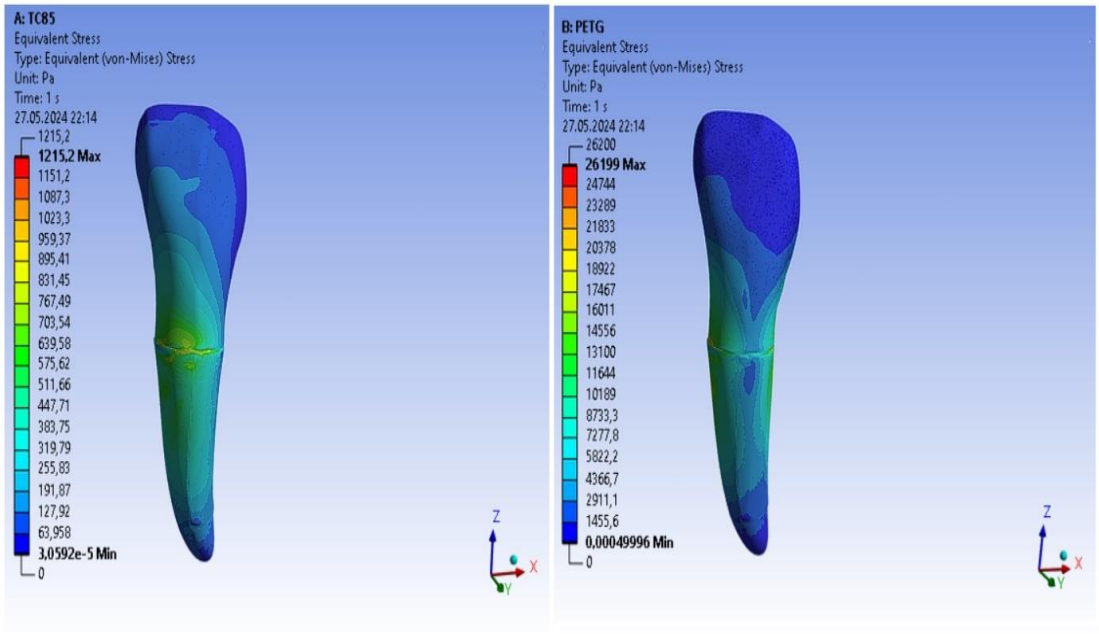
Şekil 4. 15. TC 85 Ve PetG Plağın Full Body Üzerinde Oluşturuduğu Stress/Gerilme Sonuçları



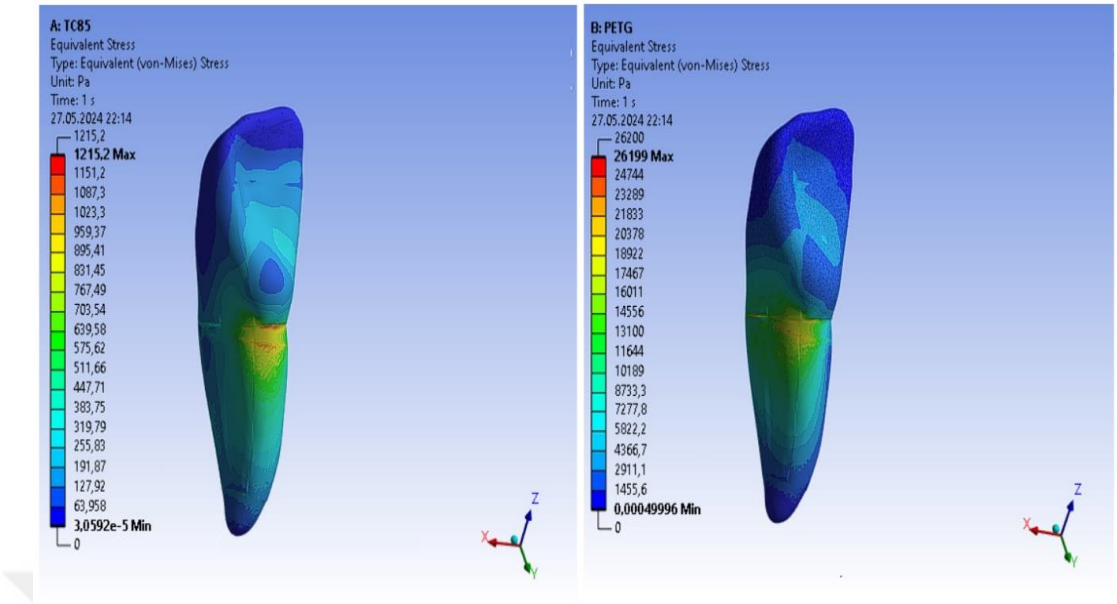
Şekil 4. 16. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları



Şekil 4. 17. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları



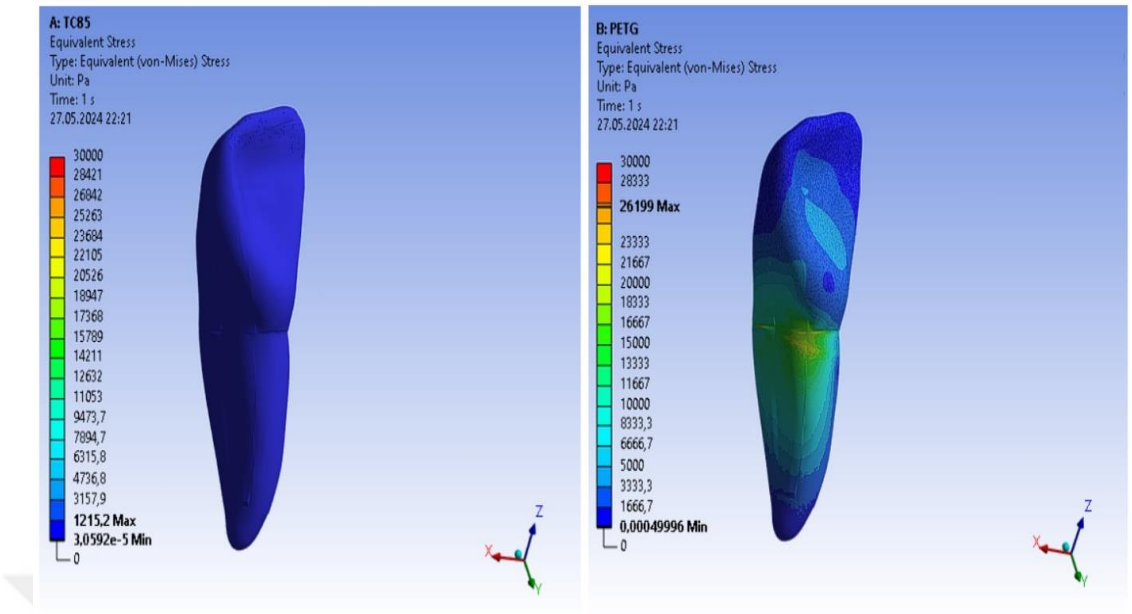
Şekil 4. 18. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları



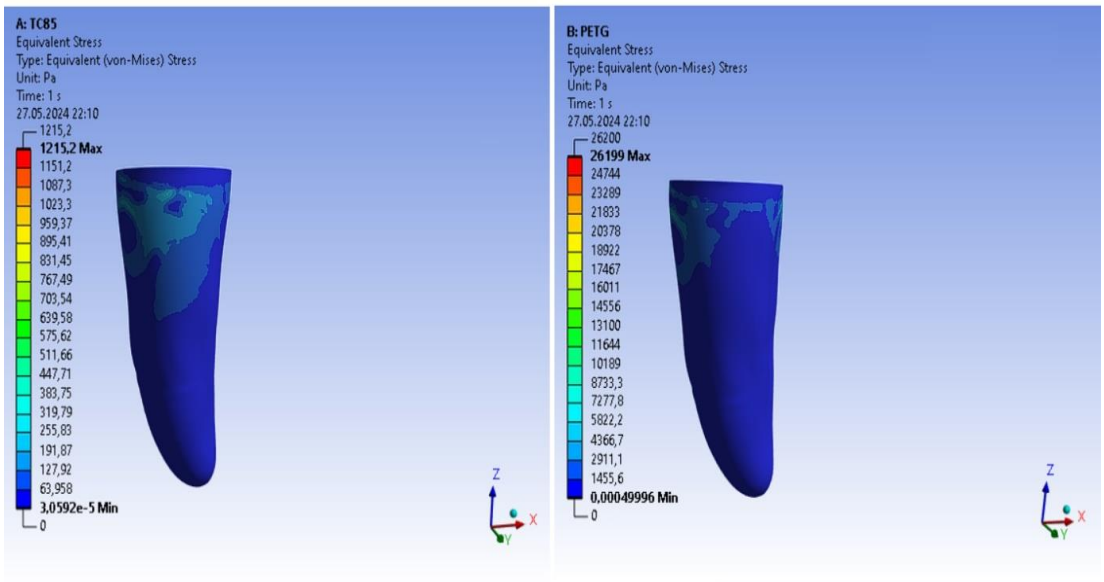
Şekil 4. 19. TC 85 Ve PetG Plağın S Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları

Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19'da santral dişin üzerinde oluşan gerilme farklı açılardan gösterilmiştir. Diş üzerinde oluşan gerilmenin büyüklükleri maksimum nokta üzerinden değerlendirildiğinde PetG kullanılarak yapılan plağın kullanılması sonucunda, Tc85'e göre 21kat daha fazla gerilme değeri gözlemlenmiştir. Şekil 3.20 da aynı ölçüde slaka kullanılarak bu durum bir kez daha sergilenmiştir.

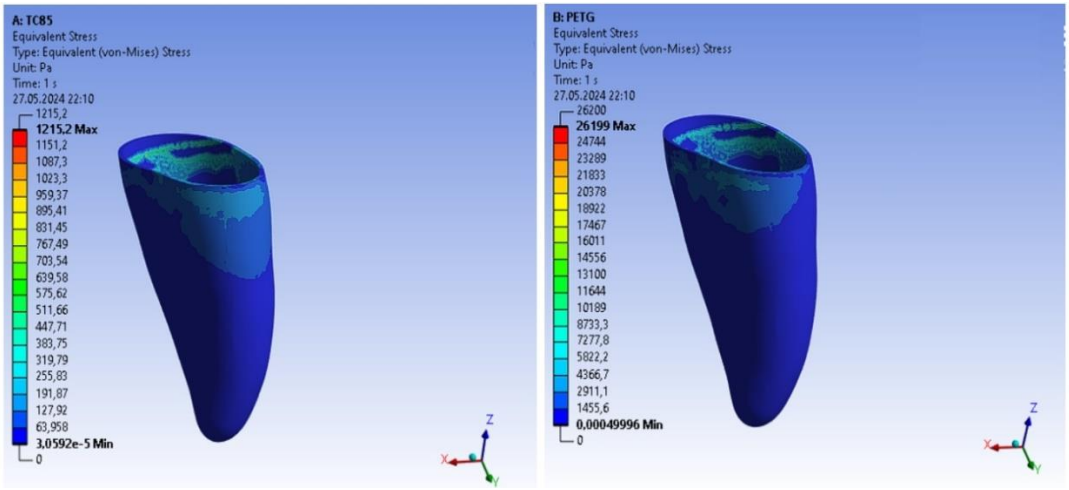
Öte yandan çıkan gerilme değerleri PDL yapısına yakın yerde maksimum değerlere ulaşmış, köke doğru gerilme değerleri azalmıştır. Çıkan gerilme dalgalanmaları birbirine çok benzesede bölgesel açıdan farklılıklar gözlemlenmiştir.TC85 den üretilen plak kullanıldığında dişin arka yüzeyinde PDL' e yakın olan bölgede görülen maksimum stress bölgesi, PetG malzeme kullanıldığında analizde kullanılan kartezyen koordinat düzleminde göre negatif Z yönüne doğru dönmüştür. Bu durum kuvvet büyüklüklerinin yanı sıra diş üzerinde oluşan gerilme dalgalarının da konumlarında farklılıklar olduğunu göstermiştir.



Şekil 4. 20. TC 85 Ve PetG Plağın Santral Diş Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları

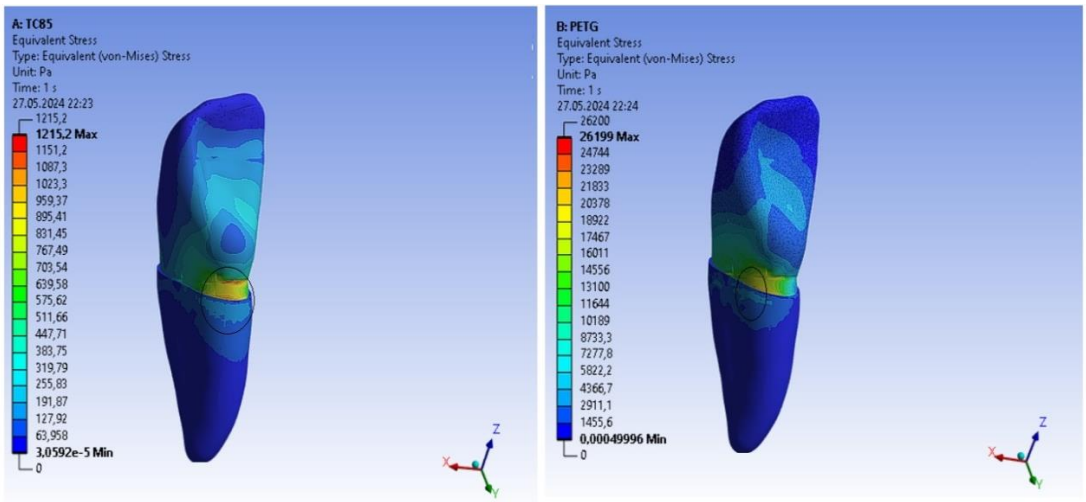


Şekil 4. 21. TC 85 Ve PetG Plağın PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları



Şekil 4. 22. TC 85 Ve PetG Plağın PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları

Şekil4.21 ve Şekil 4.22 incelendiğinde resim üzerinde her ne kadar aynı gibi gözüksede stess skalasının farklı olması aslında gerilme dalgalarının şiddetinin farklı olduğunu göstermektedir. PDL yapısı üzerinde Diş yapısında olduğu gibi stress dağılımı benzerlik göstersede Şekil 4.21de görüldüğü üzere lokal olarak farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum tedavi içerisinde kullanılan 2 farklı plağın PDL dokusuna farklı tepkiler vereceğini göstermektedir. Analizde yapılan kabuller gerçeğe yaklaştıkça çok daha hassas sonuçlar alınabilir fakat tedavide üretilecek olan dişlik sayısı, hareket miktarı ve hastanın ağız yapısı bu süreci etkileyen temel etkenlerdendir



Şekil 4. 23. TC 85 ve PetG Plağın Diş Ve PDL Üzerinde Oluşturduğu Stress Sonuçları

PDL ve Diş yapısı beraber incelendiğinde Şekil 4.23 de halka içerisine alınarak gösterilen bölgelerden de anlaşılacağı üzere açık bir şekilde görülebilir ki Diş ve PDL üzerindeki stress büyüklüklerinin yanı sıra stress dağılım bölgelerinde de farklılıklar tespit edilmiştir. Bu bulguyla beraber analiz 2 de ortaya konulan bulgular da göz önüne alındığında TC-85 malzemeden yapılan plağın şekil özelliği sebebi ile hedeflenen bölgeye kuvvet uygulama ihtimalinin daha yüksek olduğu fikrini güçlendirmektedir. Fakat TC-85 malzemenin PetG ye göre daha az rijid bir malzeme olması diğer bir değişle daha kolay deforme olabilmesi dezavantaj oluşturabilsede, PDL ve diş üzerinde daha az kuvvet uygulaması diş eti çekilmesi gibi istenmeyen reaksiyonların yaşanmasını azaltabilir. Ortaya atılan sonuçlar Tedavi içerisinde plağın malzeme özelliklerinin/ karakterizasyonunun ne derece sabit kaldığı ile de orantılıdır ve deneysel olarak test edilmelidir.

5. TARTIŞMA

Gelişen teknolojinin diş hekimliğine yansımasıyla beraber, direkt alignerlar pek çok akademik araştırmanın odağı haline gelmiştir. Bu yenilikçi plaklar, malzeme biliminden biyomekaniğe kadar çeşitli disiplinlerdeki ilerlemeleri yansıtarak, ortodontik tedavilerdeki uygulamalarını genişletmektedir. 3D yazıcılar ile doğrudan üretilen ve termoplastik yöntemlerle şekillendirilen plaklar, estetik ve fonksiyonellik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, bu plakların mekanofiziksel özelliklerini dinamik sonlu elemanlar analizi ile değerlendirerek, ortodontik tedavideki potansiyellerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

5.1. Amaçların Tartışılması

Çalışmamızda termoplastik şekillendirilen PET-G plaklar ve 3D yazıcılardan direkt olarak çıkarılan TC-85 reçine ile üretilen plakların, ortodontik diş tedavilerindeki etkisini araştırarak, bu malzemelerin mekanofiziksel özelliklerinin dinamik sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere, 3D yazıcı teknolojisinin ortodontiye yansımaları literatürde sıklıkla ele alınan bir konudur. Bu kısımda, söz konusu literatürle araştırma amaçlarımızın tartışılmasına yer verilmektedir.

McKay ve ark. (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) ise, maxiller santral kesicilerin ekstrüzyonu sırasında termoform ve 3D basılmış berrak alignerler kullanılarak dişlere uygulanan kuvvet ve momentleri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, ATMOS®, Zendura FLX® ve TC-85 malzemeleri kullanılarak farklı gruplar altında kuvvetler ölçülmüş ve bu gruplar arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Tsai ve ark. (Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10), dört yaygın oklüzal mod kullanarak periodontal ligament ve çevreleyen kemik

üzerinde ortodontik kuvvet uygulandığında biomekanik bir analiz gerçekleştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada FE modeli kullanılarak, oklüzal modların köpek dişlerinin PDL'si üzerindeki von Mises gerilimleri ve bunun klinik uygulamalara etkisi incelenmiştir. Elkholy ve ark. (Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. J Orofac Orthop. 2015;76(6)), PET-G alignerlerin üst santral kesici dişin labial ve palatal çevirisine uyguladığı kuvvet ve momentleri ölçerek, bu alignerlerin dişin vücut hareketini biomekanik olarak değerlendirilmesini amaçlamıştır. Araştırma alignerlerin farklı kalınlıklarının uyguladığı kuvvetleri karşılaştırmış ve PET-G malzemenin diş hareketleri için uygun olup olmadığını değerlendirmiştir.

Çalışmamız, McKay ve ark. (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) çalışmasıyla malzeme kullanımı ve mekanofiziksel özelliklerin değerlendirilmesi açısından paralellik göstermektedir. Her iki çalışma da farklı malzemelerin ortodontik tedavilerdeki etkinliğini sonlu elemanlar analizi ile değerlendirmiştir. Ancak McKay ve ark. (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) daha spesifik bir diş hareketi üzerinde odaklanırken, bizim çalışmamız malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesini ele almaktadır. Tsai ve arkadaşları (Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10) ve Elkholy ve arkadaşlarının (Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. J Orofac Orthop. 2015;76(6)) çalışmaları ise daha çok belirli diş hareketlerinin ve oklüzal modların biomekanik etkilerini incelemiş olup, bu çalışmalar malzemelerin mekanik özellikleri yerine tedavi tekniklerinin etkinliğine odaklanmıştır. Bu araştırmalar literatüre mekanofiziksel özelliklerin ve

uygulanan kuvvetlerin daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanıyan farklı bakış açıları kazandırmaktadır.

Wiechens ve ark. (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118), Hilliard hassas termoplierler kullanılarak değiştirilen termoplastik alınabilir cihazların (RTA'lar) üst santral kesici dişin palatal ve vestibüler yönlerine eğilme kuvvetlerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma, termoplastik cihazların biyomekanik parametrelerini modifiye edebilecek yeni bir yöntemi araştırmıştır. Xiang ve ark. (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052), iki tür PET-G materyali kullanarak, yapay tükürük içinde bekletilen şeffaf alignerlerin uyguladığı kuvvetlerin kararlılığını incelemeyi amaçlamıştır. Bu çalışma ise alignerlerin kuvvet dağılımında zamanla nasıl bir değişim olduğunu ve bu değişimin klinik pratikteki etkilerini değerlendirmiştir. Atta ve ark. (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337), 3D yazıcılarla üretilen şekil hafızalı polimerlerden yapılan aligner materyallerinin fizikokimyasal ve mekanik karakterizasyonunu yapmayı amaçlamıştır. Araştırmada şekil hafızalı polimerlerin ortodonti alanında nasıl bir devrim yaratabileceği ve bu materyallerin klinik uygulamalarda nasıl bir avantaj sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışmamız, malzemelerin ortodontik tedavilerdeki etkinliğini değerlendiren diğer çalışmalarla bazı ortak noktalara sahiptir. Wiechens ve arkadaşlarının (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118) araştırması, termoplastik alignerlerin modifikasyonu üzerine odaklanarak, bu cihazların kuvvet dağılımını nasıl etkileyebileceğini göstermiştir. Xiang ve arkadaşlarının (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of

polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) çalışması ise, farklı materyallerin yapay tükürük içindeki kuvvet kararlılığını incelemiş ve bu materyallerin zaman içindeki performansını değerlendirmiştir. Atta ve arkadaşlarının (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) çalışması ise, mekanik ve fizikokimyasal analizler yoluyla 3D yazıcılarla üretilen yeni bir materyalin potansiyel avantajlarını ortaya koymuştur. Her üç çalışma da çeşitli yöntemler ve materyaller kullanarak, ortodontik alignerlerin performansını optimize etmeye yönelik çeşitli yaklaşımları değerlendirmiştir. Araştırmalar, aligner teknolojisinin evrimi ve materyal bilimindeki yeniliklerin ortodontik tedavilere nasıl entegre edilebileceği hakkında gelişmeleri gözler önüne sermektedir.

Song ve ark. (Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48), PET-G ve PC-2858 polimerlerinin farklı oranlarda karıştırılmasından elde edilen yeni termoplastik materyalin mekanik özelliklerini karakterize etmeyi ve ticari termoplastiklerle karşılaştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada belirli bir karışım oranında optimal mekanik performans sergileyen yeni bir materyal geliştirilmesi hedeflenmiştir. Nowak ve ark. (Nowak CM, Othman A, Ströbele DA, von See C. Comparative mechanical testing for different orthodontic aligner materials over time - in vitro study. J Clin Exp Dent. 2022;14(6)), farklı ortodontik aligner malzemelerinin 12 saat boyunca mekanik kuvvetlerini karşılaştırmayı amaçlamıştır. Bu çalışma PETG materyalinin farklı üretim yöntemlerine bağlı olarak mekanik kuvvetler üzerinde bir etkisi olup olmadığını araştırmıştır. Lee ve ark. (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246), geleneksel vakum termoform yöntemlerinin sınırlamalarını aşmak için doğrudan 3D baskılı şeffaf alignerler geliştirilmesini amaçlamıştır. Araştırma, TC-85 gibi yeni bir fotokürlebilir reçine materyalin termomekanik ve viskoelastik özelliklerini analiz ederek, bu materyalin klinik uygulamalardaki avantajlarını ortaya koymuştur.

Çalışmamız, diğer araştırmalarla karşılaştırıldığında, ortodontik alignerlerin malzeme bilimindeki yenilikleri ve bu yeniliklerin klinik uygulamalara nasıl entegre edilebileceğini incelenmiştir. Song ve arkadaşlarının (Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48) çalışması, yeni bir materyal geliştirme ve bu materyalin ticari ürünlerle karşılaştırmalı performansını değerlendirmek üzerine kurulmuştur, bu da malzeme bilimindeki ilerlemeleri vurgulamaktadır. Nowak ve arkadaşlarının (Nowak CM, Othman A, Ströbele DA, von See C. Comparative mechanical testing for different orthodontic aligner materials over time - in vitro study. J Clin Exp Dent. 2022;14(6)) çalışması, malzeme performansının üretim süreçlerinden bağımsız olduğunu göstermiştir. Bu durum üretim metodolojilerinin optimizasyonuna işaret etmektedir. Lee ve arkadaşlarının (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246) çalışması ise, 3D yazıcı teknolojisinin potansiyelini ve bu teknolojinin klinik pratikte nasıl bir devrim yaratabileceğini göstermiştir. Araştırmalar ortodontik tedavilerde kullanılan malzemelerin mekanik ve fizikokimyasal özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasını sağlayarak, bu alandaki teknolojik ilerlemelere katkıda bulunmaktadır.

Tartaglia ve ark. (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799), doğrudan 3D baskılı şeffaf ortodontik alignerlerin üretimindeki güncel durumu ve gelecekteki potansiyellerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışma 3D baskının sağladığı avantajları termoform yöntemiyle üretilen alignerlere kıyasla tartışmış ve daha hassas, etkin ve tekrarlanabilir aligner üretimi sağlama potansiyelini vurgulamıştır. Bichu ve ark. (Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403), ortodontik tedavide kullanılan şeffaf aligner materyallerindeki teknolojik ilerlemeleri ve bu materyallerin klinik performansını belirleyen özelliklerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışma, aligner materyali kimyasının ve mühendisliğinin, terapötik uygulamalarda radikal dönüşümler sağlama potansiyelini

ele almıştır. Castroflorio ve ark. (Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2), Invisalign alignerleri kullanılarak tasarlanan tedavi planlarının ortodontik diş hareketlerindeki tahmin edilebilirliğini belirlemeyi amaçlamıştır. Araştırmada tedavi planlaması, aligner değişim sıklığı ve attachment'ların varlığı ve şekli gibi faktörlerin sonuçları nasıl etkilediği analiz edilmiştir.

Çalışmamız, diğer araştırmalarla karşılaştırıldığında, ortodontik tedavilerde kullanılan malzemelerin mekanik ve fizikokimyasal özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasını sağlamaktadır. Tartaglia ve arkadaşlarının (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799) çalışması, 3D baskının aligner üretimindeki avantajlarını ve gelecekteki gelişim olanaklarını vurgularken, Bichu ve arkadaşlarının (Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403) çalışması, materyal bilimindeki yeniliklerin ortodontik tedavilere nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir. Castroflorio ve arkadaşlarının (Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2) çalışması ise, tedavi tasarımının ortodontik hareket tahmin edilebilirliğine etkilerini incelerken, bu faktörlerin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Her bir çalışma, teknolojik ilerlemelerin ve materyal yeniliklerinin ortodontik aligner tedavisinde nasıl etkili olabileceğini derinlemesine değerlendirmektedir.

Narongdej ve ark. (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371), doğrudan 3D baskılı şeffaf alignerlerin üretimi üzerine kapsamlı bir inceleme yapmayı amaçlamıştır. Bu çalışmayla malzeme gelişimi, biyouyumluluk ve mekanik özelliklerdeki ilerlemeler tartışılmış, 3D baskılı alignerlerin ortodontik tedavideki etkinliği ve estetik avantajları vurgulanmıştır. Panayi (Panayi NC.

Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62), ortodontik tedavi uygulamalarında dijital teknolojilere geçişin ve bu teknolojilerin kullanımının ortodonti alanındaki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışma, dijital tarama, CAD yazılımları ve 3D yazıcıların kullanımını ele alarak, bu teknolojilerin ortodonti ofislerinde nasıl sürekli olarak uygulandığını tartışmıştır. Wang ve ark. (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769), mekanik ve elektriksel uyumun entegre edilmesi yoluyla ortodontik diş hareketini hızlandırmayı amaçlamıştır. Bu çalışma, mekanik alignerlerin sınırlamalarını aşmak ve tedavi sürecini kısaltmak için piezoelektrik bir alan kullanarak diş hareketini hızlandıran bir sistem geliştirmiştir.

Çalışmamız, Narongdej ve ark. (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) ve Panayi'nin (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) çalışmaları ile teknolojik ilerlemelerin ve 3D baskının ortodontik tedavideki potansiyelini ele almada paralellik göstermektedir. Her iki çalışma da 3D baskının sağladığı yüksek doğruluk, maliyet etkinlik ve tedavi sonuçlarını iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır. Wang ve arkadaşlarının (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769) çalışması ise, mekanik ve fiziksel uyumu entegre eden yenilikçi bir yaklaşımı ele alarak, ortodontik tedavi sürecini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Koenig ve ark. (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249), doğrudan basılmış ve termoform alignerler arasındaki boyutsal doğruluğu değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı amaçlamıştır. Çalışma, üç tip aligner üzerinde yapılan ölçümlerle, doğrudan basılmış alignerlerin daha büyük doğruluk ve hassasiyet gösterdiğini ortaya koymuştur. Grant ve ark. (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D

direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23), farklı yüzey kalınlıklarına sahip doğrudan 3D basılmış şeffaf alignerlerin maksiller santral kesicinin lingual hareketi sırasında uyguladığı kuvvet ve momentleri ölçmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma alignerlerin yüzey kalınlıklarının hedeflenen ortodontik hareketleri optimize etmek ve istenmeyen diş hareketlerini azaltmak için nasıl değiştirilebileceğini incelemiştir.

Çalışmamız, Koenig ve ark. (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) ve Grant ve arkadaşlarının (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) çalışmalarıyla ortodontik alignerlerin üretim süreçleri ve materyal özellikleri üzerine odaklanan benzer bir çerçeveyi paylaşmaktadır. Her iki çalışma da 3D baskı teknolojisini kullanarak üretilen alignerlerin performansını ve uygulama potansiyellerini incelerken, bu teknolojilerin ortodontik tedavilerde sağladığı avantajları vurgulamaktadır. Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışması, boyutsal doğruluk açısından 3D baskının üstünlüğünü belirtirken, Grant ve arkadaşlarının (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) çalışması, aligner kalınlıklarının varyasyonunun ortodontik kuvvetleri nasıl etkileyebileceğini göstermektedir. Her iki çalışma da 3D baskılı alignerlerin gelişiminde ve uygulamasında karşılaşılan teknik zorlukları ve bu zorlukların nasıl üstesinden gelinmesi gerektiğini ele almaktadır. Araştırmalar, çalışmamızın materyal ve üretim teknikleri üzerine yaptığı incelemelerle paralellik göstermektedir.

Çalışmamız, ortodontik tedavilerde kullanılan termoplastik PET-G plaklar ve TC-85 reçine ile 3D yazıcılardan direkt olarak üretilen plakların mekanofiziksel özelliklerini dinamik sonlu elemanlar analizi ile değerlendirmektedir. Bu kapsamda, araştırmamız McKay ve ark. (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) ve Atta ve ark. (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) gibi farklı materyallerin ortodontik tedavideki etkinliğini karşılaştıran çalışmalarla benzerlik göstermektedir. McKay ve ark. (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495), termoform ve 3D basılmış alignerlerin kuvvet ve momentlerini değerlendirirken, Atta ve ark. (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) ise 3D basılmış şekil hafızalı polimerlerin mekanik ve fizikokimyasal özelliklerini analiz etmiştir. Benzer şekilde, Narongdej ve ark. (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) ve Panayi'nin (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) çalışmaları, 3D baskının ortodontik tedavideki avantajlarını ve bu teknolojinin gelişim potansiyelini incelemektedir. Tartaglia ve ark. (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799) ve Bichu ve ark. (Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403), doğrudan 3D basılmış alignerlerin mevcut durumunu ve gelecekteki olasılıklarını ele alarak, 3D baskının sağladığı doğruluk ve etkinliği vurgulamaktadır.

Öte yandan, Wang ve arkadaşlarının (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769) çalışması, elektromekanik bir uyum sağlayarak ortodontik diş hareketini hızlandırmayı amaçlayan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım çalışmamızın odak noktasından farklıdır, çünkü bizim araştırmamız daha çok materyallerin mekanik özelliklerine ve ortodontik tedavi performansına odaklanmaktadır. Benzer şekilde, Song ve ark. (Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48) ve Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışmaları, farklı materyal karışımlarının ve üretim yöntemlerinin doğruluğunu ve mekanik performansını karşılaştırarak, ticari ürünlerle karşılaştırma yapmaktadır. Grant ve arkadaşlarının (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) çalışması ise, aligner kalınlıklarının kuvvet ve momentler üzerindeki etkilerini inceleyerek, hedeflenen diş hareketlerinin optimize edilmesine yönelik yaklaşımlar sunmaktadır.

Genel olarak çalışmamız farklı materyal ve üretim tekniklerinin ortodontik tedavi üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmalarla güçlü paralellikler göstermektedir. Ancak araştırmamızın spesifik olarak PET-G ve TC-85 materyallerine odaklanması ve bu materyallerin dinamik sonlu elemanlar analizi ile detaylı bir şekilde değerlendirilmesi, diğer çalışmalardan farklılıklarını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda araştırmamız mevcut literatüre önemli katkılar sunarak, 3D baskı teknolojisi ve termoplastik malzemelerin ortodontik tedavideki kullanım potansiyelini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır.

5.2. Metodolojinin Tartışılması

Çalışmamızda termoplastik PET-G plaklar ve 3D yazıcılarla doğrudan üretilen TC-85 reçine kullanılarak yapılan ortodontik diş tedavilerinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, LS DYNA ve ANSYS WORKBENCH Sonlu Eleman Analizi programları kullanılarak detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. McKay ve arkadaşlarının (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) çalışmasında ise, termoform ve 3D basılmış şeffaf aligner'lar kullanılarak maksiller santral kesici dişin ekstrüzyonu değerlendirilmiş ve dişlerde meydana gelen kuvvetler ile momentler, üç eksenli kuvvet ve moment sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Her iki çalışmada da farklı malzeme türlerine göre gruplar oluşturularak, belirlenen koşullar altında kuvvetlerin ve momentlerin etkileri analiz edilmiştir. Tsai ve ark. (Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10) tarafından yapılan çalışmada ise, dört farklı oklüzal modun periodontal ligament ve çevreleyen kemik üzerindeki biomekanik etkileri sonlu elemanlar (FE) yöntemi ile incelenmiştir. Bu çalışmada, sanal bir mandibula üzerinden oluşturulan tam mandibular FE modeli kullanılmış ve dört farklı oklüzal mod simüle edilerek, kanin periodontal ligamentlerindeki von Mises gerilimi ve deformasyonu analiz edilmiştir.

Bu çalışmaların metodolojileri karşılaştırıldığında hem bizim çalışmamızda hem de McKay ve arkadaşlarının (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) çalışmasında, çeşitli malzemeler kullanılarak yapılan aligner'ların farklı koşullar altında dişler üzerindeki etkileri ölçülmüş, ancak kullanılan malzemeler ve test koşulları farklılık göstermiştir. Tsai ve arkadaşlarının (Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10) çalışması ise daha çok oklüzal modların periodontal ligament

üzerindeki etkilerine odaklanmıştır ve bu yönüyle bizim çalışmamızdan farklılık göstermektedir. Ancak her üç çalışmada da sonlu elemanlar analizi kullanılarak detaylı bir biomekanik değerlendirme yapılmıştır. Bu bakımdan, çalışmamız Tsai ve arkadaşlarının (Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10) çalışmasıyla metodolojik olarak paralellik göstermektedir, ancak McKay ve arkadaşlarının (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) araştırmasıyla benzerlik taşımaktadır.

Wiechens ve arkadaşlarının (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118) çalışmasında, üst santral kesici dişin vestibüler ve palatal yönlerde eğilmesi için Hilliard hassas termoplierlerle modifiye edilen çıkarılabilir termoplastik aletlerin (RTA) uyguladığı kuvvet değerlendirilmiştir. Bu araştırma, farklı boyutlarda noktasal termoform kabartmalar kullanılarak ve termoplier aktivasyonu ile gerçekleştirilen değişik açılarda (30°, 60°, ve 90°) analizler içermektedir. Xiang ve ark. (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) tarafından yapılan çalışmada ise, iki farklı PET-G malzemesinden yapılmış şeffaf alignerlerin, yapay tükürük içinde farklı süreler boyunca maruz kaldıkları ortamın alignerlerin uyguladığı kuvvet üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, malzemelerin morfolojik değişiklikleri tarama elektron mikroskobu ile gözlemlenmiştir. Atta ve ark. (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) ise, termoform alignerlere kıyasla 3D basılmış şekil hafızalı aligner materyallerinin fizikokimyasal ve mekanik karakterizasyonunu yapmıştır. Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda yapılan testler ve dinamik mekanik analizler, TC-85'in

özellikle ağız sıcaklığında üstün şekil hafızası gösterdiğini ve bu özelliğinin, diş hareketlerini daha etkin bir şekilde desteklediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmaların metodolojileri incelendiğinde, Wiechens ve ark. (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118) ve Xiang ve arkadaşlarının (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) çalışmaları, malzemelerin modifikasyonu ve farklı ortamlardaki davranışları üzerine yoğunlaşırken, bizim çalışmamız ve Atta ve arkadaşlarının (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) çalışması, malzemelerin daha kapsamlı mekanik ve fiziksel özelliklerini değerlendirme eğilimindedir. Bu bağlamda, çalışmamız Wiechens ve ark. (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118) ve Xiang ve arkadaşlarının (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) çalışmalarıyla bazı metodolojik farklılıklar gösterse de, özellikle Atta ve arkadaşlarının (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) araştırmasıyla metodolojik olarak benzer yönler taşımaktadır. Araştırmalar, ortodontik tedavilerde kullanılan malzemelerin performansını anlamak için sonlu eleman analizi gibi gelişmiş tekniklerden yararlanmıştır, ancak uygulanan testler ve değerlendirilen parametreler açısından farklılıklar bulunmaktadır.

Song ve ark. (Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after

blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48) çalışmasında, PETG ve PC2858 polimerlerinin farklı oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen yeni termoplastik malzemenin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Bu çalışma, malzeme bilimindeki karışım oranlarının mekanik performans üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Nowak ve ark. (Nowak CM, Othman A, Ströbele DA, von See C. Comparative mechanical testing for different orthodontic aligner materials over time - in vitro study. J Clin Exp Dent. 2022;14(6)) ise, farklı üreticiler tarafından üretilen PETG malzemelerinden yapılan ortodontik aligner'ların 12 saat boyunca uyguladıkları kuvvetleri karşılaştırmalı olarak test etmiştir. Bu çalışma, malzemenin kaynağına bağlı olarak mekanik özelliklerde anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir. Lee ve ark. (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246) çalışmasında, TC-85 kullanılarak 3D yazıcıda doğrudan üretilen şeffaf aligner'ların termomekanik ve viskoelastik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma, TC-85 malzemesinin, yüksek sıcaklıklarda geometrik stabilitesi ve şekil hafızası özellikleri sayesinde klinik uygulamalarda avantajlar sağladığını ortaya koymuştur.

Tartaglia ve ark. (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799) ise, 3D yazıcılar kullanılarak doğrudan üretilen şeffaf ortodontik aligner'ların mevcut durumu ve gelecekteki potansiyellerini tartışmıştır. Bu çalışma, doğrudan 3D basılmış aligner'ların, termoform yöntemiyle üretilenlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve stabilite sunduğunu vurgulamaktadır. Bichu ve ark. (Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403) çalışmasında, ortodontik şeffaf aligner malzemelerindeki teknolojik ilerlemeler ve bu malzemelerin klinik performansını belirleyen özellikler üzerine geniş bir bakış açısı sunmuştur. Bu çalışma, biyoaktif malzemeler ve doğrudan 3D basılmış aligner'lar gibi yenilikçi malzemelerin ortodontik tedavilerdeki uygulamalarını ilerletme potansiyelini vurgulamaktadır.

Görüldüğü üzere hem bizim çalışmamızda hem de diğer araştırmalarda malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine yoğunlaşılmıştır. Ancak, her bir çalışma farklı malzemeler, karışımlar veya üretim teknikleri üzerinden bu özellikleri değerlendirmiştir. Bizim çalışmamız, özellikle Lee ve ark. (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246) ve Tartaglia ve arkadaşlarının (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799) çalışmalarıyla metodolojik olarak benzerlik göstermektedir. Çünkü her üçü de 3D basım teknolojilerinin avantajlarını ve malzemelerin performansını detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda, malzemelerin mekanik performansını değerlendirme ve karşılaştırma konusunda genel bir metodolojik paralellik bulunmaktadır.

Castroflorio ve ark. (Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2) çalışmasında, Invisalign aligner'lar kullanılarak yapılan ortodontik diş hareketlerinin (OTM) öngörülebilirliği incelenmiştir. Bu çalışmada, tedavi planının tasarımı, attachment'ların varlığı ve şekli ile hastaların demografik özelliklerinin OTM'nin öngörülebilirliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bazı diş hareketlerinin ve attachment tiplerinin etkinliğinin sınırlı olduğunu göstermiştir. Narongdej ve ark. (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) ise, direkt 3D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen şeffaf aligner'lar üzerine kapsamlı bir değerlendirme yapmıştır. Bu çalışma, 3D baskı teknolojisinin ortodonti ve diğer diş hekimliği alanlarında nasıl entegre edildiğini ve bu teknolojinin malzeme maliyetlerini nasıl azalttığına dair bilgiler sunmuştur. Ayrıca, 3D baskılı aligner'ların mekanik özellikleri, biyouyumlulukları ve genel kalitelerindeki gelişmeleri ele almıştır. Her iki çalışma da ortodontik tedavilerde kullanılan malzemelerin ve tekniklerin etkinliğini değerlendirme odaklıdır. Ancak, Castroflorio ve arkadaşlarının (Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus

A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2) çalışması spesifik aligner tasarımları ve klinik uygulamaları üzerine yoğunlaşırken, Narongdej ve arkadaşlarının (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) çalışması daha geniş bir perspektiften, 3D baskı teknolojilerinin ortodontiye entegrasyonunu ve bu teknolojilerin sunduğu potansiyelleri değerlendirmektedir. Bu bağlamda, çalışmamız ve Narongdej ve arkadaşlarının (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) çalışması, 3D baskı teknolojilerinin ortodontik uygulamalarda kullanımının avantajlarını ve bu teknolojilerin ortodonti alanındaki evrimini benzer metodolojilerle incelenmiştir. Bu yönleriyle, her iki çalışma da 3D baskı teknolojilerinin ortodontik tedavilerdeki uygulamalarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Panayi (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) çalışmasında, geleneksel analog alet üretiminin yavaşça dijital üretime geçişi ve bu süreçte 3D teknolojisinin kullanımının artışı ele alınmıştır. Bu çalışma, doğrudan basılan aligner'ların termoform aligner'lara göre birçok avantaj sağladığını ve bu teknolojinin ortodonti alanındaki geleceğini şekillendirebileceğini öne sürmüştür. Wang ve ark. (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769) ise, oklüzal enerjiyi piezoelektrik bir alan haline getirerek diş hareketlerini hızlandırmayı amaçlayan bir elektromekanik sinerjik dental aligner geliştirmiştir. Bu aligner, deneysel olarak yaşa bağlı doku durumlarına göre değişen ortodontik etkinlik göstermiş ve diş hareketlerini mekanik olarak hızlandırmıştır. Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışmasında ise, doğrudan basılan ve termoform aligner'ların boyutsal doğruluğunu karşılaştırmıştır. Bulgular, doğrudan

basılan aligner'ların, termoform aligner'lara göre daha yüksek doğruluk ve hassasiyet sunduğunu göstermiştir.

Bu çalışmaların metodolojileri karşılaştırıldığında, Panayi (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) ve Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışmaları, 3D baskı teknolojisinin ortodonti alanında kullanımını ve bu teknolojinin sağladığı avantajları vurgulamaktadır. Wang ve arkadaşlarının (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769) çalışması ise, yeni bir elektromekanik yaklaşımın potansiyelini ortaya koymaktadır. Bizim çalışmamız, bu teknolojilerin kullanımıyla üretilen aligner'ların mekanik ve fiziksel özelliklerini analiz etmektedir ve bu yönüyle Panayi (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) ve Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışmalarıyla metodolojik benzerlikler taşımaktadır. Her üç çalışma da, doğrudan 3D baskı teknolojisini kullanarak daha etkin ve hassas ortodontik tedavi yöntemleri geliştirme potansiyelini göstermektedir.

Grant ve ark. (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) tarafından yapılan çalışmada, doğrudan 3D basılmış şeffaf aligner'ların, labial ve lingual yüzey kalınlıklarının değişken olduğu durumlarda, maksiller santral kesici dişin lingual hareketi sırasında uyguladığı kuvvetler ve momentler ölçülmüştür. Bu in vitro çalışmada, farklı kalınlıklara sahip DPA'lar kullanılmış ve bu aligner'ların diş hareketlerine olan etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, doğrudan basılan aligner'ların labial ve lingual yüzey kalınlıklarının artırılmasının, diş hareketlerini optimize ederken istenmeyen

hareketleri en aza indirgediğini göstermiştir. Bu bulgular, doğrudan basılan aligner'ların kuvvet ve moment üretimini, kontrollü bir şekilde değiştirilebilir yüzey kalınlıklarıyla özelleştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. Grant ve arkadaşlarının (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) çalışması, metodoloji açısından bizim çalışmamızla paralellik göstermektedir. Çünkü her iki çalışma da 3D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen ortodontik cihazların mekanik özelliklerini değerlendirmektedir. Bu çalışmalar, 3D basılmış dental cihazların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır ve ortodontik tedavilerde kullanılan materyallerin performansını anlamak için sonlu eleman analizini kullanmaktadır.

Literatürdeki bu çalışmalar ile kendi metodolojimizi karşılaştırdığımızda, 3D baskı teknolojisinin ortodontik aligner üretimindeki etkinliğini ve potansiyel avantajlarını gösteren güçlü bir korelasyon olduğunu görmekteyiz. Bu teknolojinin, malzeme bilimi ve biyomekanik optimizasyon ile birleştirilmesinin, ortodontik tedavi pratiklerini nasıl dönüştürebileceği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız da bu gelişmeleri destekleyici nitelikte olup, alanımızda önemli bir katkı sağlamaktadır.

5.3. Bulguların Tartışılması

Bu araştırmada termoplastik şekillendirilen PET-G ve doğrudan 3D yazıcıdan üretilen TC-85 reçineleri kullanılarak yapılan indirekt ve direkt aligner'ların mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. LS DYNA ve ANSYS WORKBENCH sonlu elemanlar analiz programları aracılığıyla yapılan detaylı simülasyonlar, bu malzemelerin ortodontik diş tedavilerindeki etkinliklerini ve dayanıklılıklarını ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, TC-85 malzemesi, sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak meydana gelen şekil hafızası özelliği sayesinde, uygulanan yüksek kuvvetler altında bile başlangıç geometrisini koruma konusunda üstün bir performans sergilemiştir. Özellikle 600 Newton’luk bir kuvvet uygulandığında ve sıcaklık 352K/78,85°C’ye çıkarıldığında, TC-85 malzemesinin deformasyonu, sıcaklık

düşürüldüğünde %92,49 oranında geri kazanılmıştır. Buna karşın, PET-G malzemesi daha rijit bir yapı sergileyerek, benzer koşullar altında daha az deformasyon yaşamış ve böylece yüksek kuvvetlere daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu rijitlik, malzemenin başlangıç formunu kuvvet altında koruma kapasitesini sınırlamaktadır. PET-G'nin stres testlerinde daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiş, bu da malzemenin yük altında daha fazla sabit kaldığını ancak daha az esnek olduğunu ortaya koymuştur.

McKay ve arkadaşlarının (McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495) gerçekleştirdikleri çalışmada ATMOS® ve Zendura FLX® gibi termoform materyallerle ve TC-85 gibi 3D basılmış reçinelerle yapılan şeffaf aligner'ların, maksiller santral kesici diş üzerindeki çıkarma kuvvetlerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, TC-85 grubu, ATMOS® ve Zendura FLX® gruplarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük kuvvet ve moment uygulamıştır. Bu sonuçlar, her iki çalışmanın da TC-85 malzemesinin, yüksek esnekliği ve sıcaklığa duyarlı şekil hafızası ile dişin istenilen bölgesine daha doğru kuvvet transferi sağladığını ve böylece daha az istenmeyen kuvvet uyguladığını göstermektedir. Elkholy ve arkadaşlarının (Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. J Orofac Orthop. 2015;76(6)) yaptığı çalışma ise, PET-G malzemesinin kullanıldığı aligner'lar ile yapılan labial ve palatal çevirme hareketleri sırasında uygulanan kuvvet ve momentleri biomekanik olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada, farklı kalınlıklardaki PET-G aligner'ların, uygulanan kuvvetleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Elkholy ve arkadaşlarının (Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. J Orofac Orthop. 2015;76(6)) bulguları, PET-G malzemesinin daha kalın aligner'lar kullanıldığında daha yüksek kuvvetler uygulayabildiğini ve bu durumun, termoplastik PET-G'nin yüksek mekanik strese karşı direncini desteklediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, PET-G ve TC-85 malzemelerinin,

ortodontik uygulamalarda malzeme seçiminin önemini ve bu malzemelerin özelliklerine göre nasıl optimize edilebileceğini vurgulamaktadır.

Wiechens ve ark. (Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118) tarafından yapılan çalışma, Ideal Clear® (polietilen tereftalat glikol kopolimer, PETG) malzemeden yapılmış 1 mm kalınlığında toplam 10 adet aligner kullanılarak, Hilliard hassas termopliers ile modifiye edilen çıkarılabilir termoplastik aygıtların (RTA, aligner) bir üst merkezi diş üzerinde uyguladığı kuvvetleri değerlendirmiştir. Çalışma, Hilliard termoplierlerin aktivasyonuyla elde edilen farklı yüksekliklerdeki çıkıntıların (bump) dişin palatal ve vestibüler yönlerinde uyguladığı tipping (Fx) ve intrusive (Fz) kuvvet bileşenlerini ölçmüştür. Bu araştırma, PETG malzemesinin mekanik modifikasyonlarla nasıl farklı biomekanik parametreler sergileyebileceğini ve bu değişikliklerin klinik uygulamalarda nasıl faydalı olabileceğini göstermiştir. Bu bulgu PET-G'nin deformasyon kapasitesi ve mekanik direnci hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır.

Xiang ve arkadaşlarının (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) çalışması ise, iki tür polietilen tereftalat glikol modifiye şeffaf aligner'ın yapay tükürükte maruz kaldığı kuvvet etkilerini araştırmıştır. Çalışma, farklı aktivasyonlara sahip 90 adet şeffaf aligner kullanarak, bu aligner'ların yapay tükürükte 0, 3, 7, 10, 14 gün boyunca maruz kaldıkları kuvvetleri ölçmüştür. Xiang ve arkadaşlarının (Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052) bulguları, modifiye PETG aligner'ların, konvansiyonel PETG aligner'lara kıyasla daha yüksek ve daha stabil kuvvetler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, PET-G malzemesinin modifikasyonlarının, malzemenin mekanik özelliklerini ve klinik performansını nasıl etkileyebileceğine dair önemli bilgiler sağlamaktadır.

Atta ve arkadaşlarının (Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337) çalışması ise, 3D basılı şekil hafızalı aligner malzemelerinin fizikokimyasal ve mekanik karakterizasyonunu termoform aligner malzemeleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma, TC-85 gibi 3D basılı malzemelerin, ortodontik aligner alanında, termoform malzemelere göre daha uygun mekanik özellikler sergileyebileceğini ve klinik uygulamalarda malzeme atıklarını azaltarak üretim maliyetlerini düşürebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, TC-85 malzemesinin yüksek şekil hafızası ve esnekliği ile diş hareketlerini daha etkin bir şekilde gerçekleştirebileceğini ve bu özelliklerin, malzemenin klinik etkinliğini ve dayanıklılığını artırabileceğini vurgulamaktadır. Song ve arkadaşlarının (Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48) çalışması, PETG ve PC2858 polimerlerinin farklı oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen yeni termoplastik malzemenin mekanik özelliklerini karakterize etmeyi ve ticari termoplastiklerle karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Araştırma, PETG/PC2858 karışımının %70/30 oranında optimal mekanik özelliklere sahip olduğunu, bu oranın Erkodur ve Biolon gibi ticari ürünlerden daha üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, termoplastik malzemelerin özelliklerinin, karışım oranlarıyla nasıl optimize edilebileceğini ve bu malzemelerin ortodontik uygulamalarda nasıl daha etkili kullanılabileceğini göstermektedir.

Nowak ve arkadaşlarının (Nowak CM, Othman A, Ströbele DA, von See C. Comparative mechanical testing for different orthodontic aligner materials over time - in vitro study. J Clin Exp Dent. 2022;14(6)) çalışması, farklı üretici firmalar tarafından üretilen PETG bazlı ortodontik aligner malzemelerinin zaman içindeki mekanik performanslarını karşılaştırmaktadır. Çalışma, 12 saat boyunca uygulanan mekanik testler sonucunda, Duran ve Erkodur markaları arasında maksimum kuvvet açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını belirtmiştir. Bu sonuçlar, PETG malzemesinin, üretici firmadan bağımsız olarak, mekanik kuvvetleri üretmede sabit bir performans sergilediğini ve zamanla kuvvetlerin alt sınırına doğru bir eğilim göstermediğini ortaya koymaktadır.

Lee ve arkadaşlarının (Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246) araştırması, geleneksel vakum termoformlama yöntemlerinin aksine, doğrudan 3D baskı yöntemiyle üretilen şeffaf aligner'ların termomekanik ve viskoelastik özelliklerini incelenmiştir. Çalışma, TC-85 fotokürleşebilen reçinesinin, polietilen tereftalat glikolden üretilen geleneksel termoplastik malzemelerle karşılaştırıldığında, 37 °C'de 60 dakika boyunca şekil hafızası özelliği sayesinde dişlere sürekli hafif bir kuvvet uygulayabildiğini ve bu özelliğin klinik uygulamalarda avantaj sağladığını göstermiştir. Ayrıca, TC-85 malzemesinin yüksek sıcaklıklardaki geometrik stabilitesi ve şekil hafızası özellikleri, onun ortodontik tedavilerde kullanımı için önemli avantajlar sunmaktadır.

Tartaglia ve arkadaşlarının (Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799) çalışması doğrudan 3D baskı teknolojisinin, ortodontik maloklüzyon tedavisinde nasıl devrim yaratabileceğini ve termoform yöntemlerine kıyasla 3D basılı aligner'ların sunduğu avantajları tartışmaktadır. Makale, 3D basılı aligner'ların, daha iyi uyum, daha yüksek etkinlik ve tekrarlanabilirlik sunmasının yanı sıra, malzeme kalınlığını kontrol etme ve diş hareketlerini üretmek için kullanılan kuvvet vektörlerini daha iyi yönetme yeteneği nedeniyle üstün olduğunu belirtmektedir. Bu çalışma, doğrudan 3D basılı aligner'ların, submilimetre hareketlerin tedavi sonucundaki fark yaratabileceği ortodontik tedavilerde daha stabil bir yöntem sunduğunu öne sürmekte ve bu yeni teknoloji ve malzemelerin daha fazla in vitro ve in vivo çalışmalarla test edilmesini teşvik etmektedir. Bichu ve arkadaşlarının (Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403) çalışması, ortodontik tedavilerde kullanılan şeffaf aligner materyallerinin gelişimine odaklanmaktadır. Bu çalışma, biyomalzemeler, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve üretim (CAM) teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler sayesinde şeffaf aligner terapilerinin (CAT) ortodontik tedavide önemli bir yer edindiğini vurgulamaktadır. Çalışma, mevcut aligner materyallerinin tüm yelpazesini kapsamlı bir şekilde ele alarak, ağız ortamında performanslarını belirleyen kritik özelliklerini açıklamaktadır. Şekil

hafızalı polimerler, doğrudan 3D basılan şeffaf alignerler ve biyoaktif materyaller gibi yenilikçi aligner materyallerinin CAT uygulamalarını ilerletmede önemli olduğu, ayrıca aligner üreticileri, klinisyenler ve kullanıcılar arasında çevresel sorumluluk bilincinin artırılmasının, sürdürülebilir bir gezegen için iklim değişikliği hedeflerimizle daha iyi bir uyum sağlamak için şart olduğu belirtilmektedir. Castroflorio ve arkadaşlarının (Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2) çalışması, Invisalign alignerlerle yapılan ortodontik diş hareketlerinin öngörülebilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, tasarımın uzman operatörler tarafından yapıldığında hangi ortodontik diş hareketlerinin daha az öngörülebilir olduğunu, bağlantı elemanlarının varlığı ve şeklinin OTM'nin öngörülebilirliğini nasıl etkilediğini ve hasta demografisinin OTM öngörülebilirliğini etkileyip etkilemediğini tanımlamak için tasarlanmıştır. Sonuçlar, sadece maksiller ilk moların rotasyonu hariç tüm diş grupları ve hareketler için düzeltilmemiş hareketlerin anlamlı olduğunu göstermiştir. En büyük sapmalar, yuvarlak şekilli taçlara sahip dişlerin açısal hareketleri ve rotasyonları için bulunmuş, her 1° reçete edilen için yaklaşık 0.4° sapma olduğu belirlenmiştir. Çalışma, aligner değişiklik sıklığının ve bağlantı elemanlarının kullanımının sonuçları etkilediğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçları, virtual tedavi planını doğru bir şekilde tasarlamaya olanak tanıyarak, hangi bağlantıların en etkili olduğunu ve ne kadar fazla düzeltmenin gerektiğini açığa çıkarmaktadır.

Narongdej ve arkadaşlarının (Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371) çalışması, doğrudan 3D baskı teknolojileri kullanılarak şeffaf aligner üretimindeki ilerlemeleri kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışma, CAD/CAM protokollerinin aligner üretimini nasıl değiştirdiğini ve 3D baskı teknolojisinin diş hekimliği alanında, özellikle ortodonti ve oral cerrahi başta olmak üzere, periodontoloji, protez ve oral implantoloji gibi alanlarda nasıl entegre edildiğini ele almaktadır. Bu entegrasyonun, malzeme ve işçilik maliyetlerini azaltırken, kompleks geometrik yapıların yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak

tanıdığı belirtilmektedir. Ayrıca, sürekli gelişen malzeme bilimi sayesinde aligner'ların mekanik özellikleri, biyouyumlulukları ve genel kalitelerinin arttığı, bu sayede daha az invaziv, daha maliyet etkin ve mevcut tedavi seçeneklerine kıyasla benzer sonuçlar sağlayacak şekilde geliştiği vurgulanmaktadır.

Panayi'nin (Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62) çalışması, ortodonti alanında analog cihaz üretiminden dijital üretime geçişin, bilgisayarların ve CAD yazılımlarının ortaya çıkışıyla nasıl hızlandığını tartışmaktadır. Bu çalışma özellikle son yıllarda daha görünmez bir tedavi yöntemi tercih edildiğinde alternatif olarak sunulan termoform aligner'ların yerini alabilecek doğrudan basılmış yeni bir aligner reçinesinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Doğrudan basılmış aligner'ların, termoform aligner'lara kıyasla birçok avantajı olduğu ve bu yeni teknolojinin, workflow ve aligner baskı sonuçlarının tüm yönlerini araştırmak için başlatılan çalışmaların devam etmesi gerektiği belirtilmektedir. Wang ve arkadaşlarının (Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769) çalışması, maloklüzyon tedavisinde kullanılan mekanik ortodontik aligner'ların yönlendirme kapasitesindeki yetersizlikleri ele almakta ve bu sorunu çözmek için yeni bir çözüm önermektedir. Bu çalışma, oklüzyon enerjisini piezo-elektrik bir alan yaratarak diş hareketini hızlandıran bir oklüzyon-aktive elektromekanik sinerjistik dental aligner tasarlamıştır. Yapılan deneyler, bu yöntemin genç ve yaşlı Sprague-Dawley sıçanlarda ortodontik verimliliği sırasıyla %34 ve %164 oranında artırdığını göstermiştir. Çalışma, bu sinerjistik müdahalenin mikroçevreyi düzenleyerek osteoblast ve osteoklast aktivitesini artırdığını, alveolar kemik metabolizmasını teşvik ettiğini ve sonuç olarak diş hareketini hızlandırdığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, maloklüzyonların kişiselleştirilmiş ve etkili tedavisi için mükemmel bir potansiyele sahip olduğunu ve bu sayede uzun ortodontik tedavi sürecinin getirdiği sıkıntıları büyük ölçüde azaltabileceğini vurgulamaktadır.

Koenig ve arkadaşlarının (Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and

thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249) çalışması, doğrudan basılan ve termoformlu aligner'ların boyutsal doğruluğunu karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Çalışma, Zendura FLX™ ve Essix ACE™ kullanılarak üretilen termoformlu aligner'lar ile Tera Harz™ TC-85DAP 3D Yazıcı UV Reçinesi kullanılarak basılan doğrudan basılan aligner'ları kapsamaktadır. Her iki tür aligner da, referans standart tessellation language (STL) dosyasıyla karşılaştırılarak boyutsal farklar incelenmiştir. Bulgular, doğrudan basılan aligner'ların, termoformlu aligner'lara kıyasla daha yüksek doğruluk ve hassasiyet gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, doğrudan 3D baskı teknolojisinin, özellikle aligner üretimindeki potansiyelini vurgulamaktadır ve bu yöntemin klinik uygulamalarda tercih edilmesinin nedenlerini açıklamaktadır.

Grant ve arkadaşlarının (Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23) çalışması ise, farklı yüzey kalınlıklarına sahip doğrudan basılan şeffaf aligner'ların, maksiller santral kesici dişin lingual hareketi sırasında ürettiği kuvvet ve momentleri ölçmeyi hedeflemektedir. Çalışma, Tera Harz TC-85 ile basılan ve 0.50 mm kalınlığında standart, seçili bölgelerde 1.00 mm kalınlığa çıkarılan yüzey kalınlıklarıyla modifiye edilen doğrudan basılan aligner'ları kullanmıştır. Sonuçlar, yüzey kalınlığının artırılmasının, kuvvet ve moment düzeylerini ve dolayısıyla diş hareketlerinin kontrolünü etkileyebileceğini göstermiştir. Bu çalışma, doğrudan basılan aligner'ların tasarımında yapılan değişikliklerin, ortodontik tedavi sürecinde diş hareketlerini optimize etme ve istenmeyen hareketleri en aza indirme potansiyeline işaret etmektedir.

Görüldüğü gibi, araştırma bulgularımız genel olarak literatürle uyumludur. Özellikle TC-85 malzemesinin yüksek termal direnci ve şekil hafızası özellikleri, modern 3D baskı teknolojileriyle üretilen aligner'ların, geleneksel yöntemlerle üretilenlere göre daha üstün klinik performans sergileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, malzeme modifikasyonlarının ve tasarım iyileştirmelerinin, aligner'ların ortodontik tedavideki etkinliğini artırabileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu araştırmada ısıyla şekillendirilen PET-G ve doğrudan 3D yazıcılardan üretilen TC-85 reçineleri kullanılarak yapılan indirekt ve direkt aligner'ların mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. LS DYNA ve ANSYS WORKBENCH sonlu elemanlar analiz programları aracılığıyla yapılan detaylı simülasyonlar, bu malzemelerin ortodontik diş tedavilerindeki etkinliklerini ve dayanıklılıklarını ortaya koymuştur.

Analiz sonuçlarına göre, TC-85 malzemesi, sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak meydana gelen şekil hafızası özelliği sayesinde, uygulanan yüksek kuvvetler altında bile başlangıç geometrisini koruma konusunda üstün bir performans sergilemiştir. Özellikle 600 Newton'luk bir kuvvet uygulandığında ve sıcaklık 352K/78,85°C'ye çıkarıldığında, TC-85 malzemesinin deformasyonu, sıcaklık düşürüldüğünde %92,49 oranında geri kazanılmıştır. Bu durum TC-85'in yüksek ısıl dayanıklılığa ve elastikiyete sahip olduğunu göstermektedir.

Buna karşın, PET-G malzemesi daha rijit bir yapı sergileyerek, benzer koşullar altında daha az deformasyon yaşamış ve böylece yüksek kuvvetlere daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu rijitlik, malzemenin başlangıç formunu kuvvet altında koruma kapasitesini sınırlamaktadır. PET-G'nin stres testlerinde daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiş, bu da malzemenin yük altında daha fazla sabit kaldığını ancak daha az esnek olduğunu ortaya koymuştur.

Araştırmamızda değerlendirilen her iki malzeme de belirli avantajlara sahiptir. TC-85, yüksek esnekliği ve sıcaklığa duyarlı şekil hafızası ile dişin istenilen bölgesine daha doğru kuvvet transferi sağlarken, PET-G'nin rijiditesi, özellikle yüksek mekanik stres altında daha stabil bir seçenek sunmaktadır. Bu çalışma, 3D yazıcı teknolojisini kullanarak üretilen dental malzemelerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamış ve bu malzemelerin diş tedavilerinde nasıl optimize edilebileceğine dair önemli bilgiler sunmuştur. Yapılacak sonraki çalışmalar, bu malzemelerin daha da geliştirilmesi ve farklı klinik senaryolarda uygulanabilirliğinin araştırılmasına odaklanmalıdır.

7. KAYNAKLAR

1. Rossini G, diğerleri. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. Angle Ortho. 2015;85(5):881-889.
2. Lombardo L, diğerleri. Optical properties of orthodontic aligners—spectrophotometry analysis of three types before and after aging. Progress in Orthodontics. 2015;16(1):1-8.
3. Pazzini L, diğerleri. Mechanical properties of "two generations" of teeth aligners: Change analysis during oral permanence. Dental Materials Journal. 2018;37(5):835-842.
4. Malik OH, McMullin A, Waring DT. Invisible orthodontics part 1: Invisalign. Dental update. 2013;40(3):203-215.
5. Jindal P, diğerleri. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2019;156(5):694-701.
6. Hertan E, diğerleri. Force profile assessment of direct-printed aligners versus thermoformed aligners and the effects of non-engaged surface patterns. Progress in Orthodontics. 2022;23(1):1-8.
7. Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. Sci Rep. 2022;12(1):6246.
8. Can E, diğerleri. In-house 3D-printed aligners: effect of in vivo ageing on mechanical properties. European Journal of Orthodontics. 2022;44(1):51-55.
9. Goracci C, diğerleri. Clinically relevant properties of 3D printable materials for intraoral use in orthodontics: a critical review of the literature. Materials. 2023;16(6):2166.
10. Zinelis S, diğerleri. Comparative analysis of mechanical properties of orthodontic aligners produced by different contemporary 3D printers. Orthodontics & Craniofacial Research. 2022;25(3):336-341.

11. Özcan M. The effects of light and vibration application on aligner treatment duration cases with lower crowding of mandibular incisors. PhD Thesis, Yeditepe University; 2022.
12. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. American Journal of Orthodontics and Oral Surgery. 1945;31(5):297-304.
13. Nahoum HI. The vacuum formed dental contour appliance. N Y State Dent J. 1964;9:385-390.
14. Lindauer SJ, Shoff RC. Comparison of Essix and Hawley retainers. J Clin Orthod. 1998;32(2):95-97.
15. McNamara JA, Kramer KL, Juenker JP. Invisible retainers. J Clin Orthod. 1985;19(8):570-578.
16. Rinchuse DJ. Active tooth movement with Essix-based appliances. JCO. 1997;31(2):109-112.
17. Proffit WR. Contemporary Orthodontics. Elsevier; 2007.
18. Sheridan JJ, Hilliard K, Armbruster P. Essix Appliance Technology: Applications, Fabrication and Rationale. GAC International. 2003:45-95.
19. Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix appliances: minor tooth movement with divots and windows. J Clin Orthod. 1994;28(11):659-663.
20. Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. J Clin Orthod. 1993;27(1):37-45.
21. Boyd RL. John Valentine Mershon Lecture. Presentation at the annual meeting of the American Association of Orthodontists. San Diego: yazarı bilinmiyor; 1999.
22. Wong BH. Invisalign A to Z. Am J Orthod. 2001;121(5):540-541.
23. Schuster S, diğerleri. Structural conformation and leeching from in vitro aged and retrieved Invisalign appliances. Am J Ortho and Dentofac Orthop. 2004;126(6):725-728.
24. Kim TW. An aesthetic orthodontic treatment option: Fabrication and applications. Dent Today. 2008;27(6):132-135.

25. Kim TW. Illustrated Clear Aligner Fabrication Procedure. Myungmun Publishing, Inc.; 2007a.

26. Kim TW. Clear Aligner Manual. Myungmun Publishing, Inc.; 2007b.

27. Joffe L. Invisalign®: early experiences. J Orthod. 2003;30(4):348-352.

28. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. Aust Dent J. 2017;62(1):58-62.

29. Phan X, Ling PH. Clinical limitations of Invisalign. J Can Dent Assoc. 2007;73(3):263-266.

30. Kim TW, Echarri P. Clear aligner: an efficient, esthetic, and comfortable option for an adult patient. World J Orthod. 2007;8(1):13-18.

31. Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2005;128(3):292-298.

32. Kuncio D, diğerleri. Clear aligner: revisited. Angle Orthod. 2007;77(5):864-869.

33. Li W, Wang S, Zhang Y. The effectiveness of the Invisalign appliance in extraction cases using the the ABO model grading system: a multicenter randomized controlled trial. Int J Clin Exp Med. 2015;8(5):8276.

34. Pavoni C, diğerleri. Self-ligating versus Invisalign: analysis of dento-alveolar effects. Annali di stomatologia. 2011;2(1):23.

35. Lanteri V, diğerleri. The efficacy of orthodontic treatments for anterior crowding with Invisalign compared with fixed appliances using the Peer Assessment Rating Index. Quintessence Int. 2018;49(7):581-587.

36. Gu J, diğerleri. Evaluation of Invisalign treatment effectiveness and efficiency compared with conventional fixed appliances using the Peer Assessment Rating index. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2017;151(2):259-266.

37. Peter E, Monisha J, George SA. Are clear aligners environment friendly? American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2022;161(5):619-20.

38. Al-Hashimi, R. Plastic waste with clear aligner therapy. Br Dent J. 2023;235(10):763.

39. Veseli E, Veseli K, Behluli E. Recyclable aligners. Br Dent J, 2024;236(360).

40. Thakkar D, diğerleri. Seamless workflows for in-house aligner fabrication. Seminars in Orthodontics; 2023.

41. Sachdev S, Tantidhnazet S, Saengfai NN. Accuracy of tooth movement with in-house clear aligners. J World Fed Orthod. 2021;10(4):177-182.

42. Rungrojwittayakul O, diğerleri. Accuracy of 3D printed models created by two technologies of printers with different designs of model base. Journal of Prosthodontics. 2020;29(2):124-128.

43. Sherman SL, diğerleri. Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2020;157(3):422-428.

44. Arnold C, diğerleri. Surface quality of 3D-printed models as a function of various printing parameters. Materials. 2019;12:1970.

45. Kamran M, Saxena A. A comprehensive study on 3D printing technology. MIT Int J Mech Eng. 2016;6(2):63-69.

46. Lee JM, diğerleri. 3D bioprinting processes: A perspective on classification and terminology. Int J Bioprint. 2018;4(2).

47. Gibson I, diğerleri. Additive manufacturing technologies. Springer; 2021.

48. Wada J, diğerleri. Effect of 3D Printer Type and Use of Protection Gas during Post-Curing on Some Physical Properties of Soft Occlusal Splint Material. Polymers (Basel). 2022;14:4618.

49. Sönmez S, Kesen U, Dalgıç C. 3 Boyutlu Yazıcılar. 6th International Printing Technologies. 2018:471-481.

50. El-Katatny I, Masood SH, Morsi YS. Error analysis of FDM fabricated medical replicas. Rapid Prototyping Journal. 2010;16(1):36-43.

51. Lee K-Y, diğerleri. Accuracy of tooth movement with in-house clear aligners. The Korean Journal of Orthodontics. 2015;45(5):217-225.

52. Shivapuja P, diğerleri. Direct 3D-Printed Orthodontic Aligners with Torque, Rotation, and Full Control Anchors. 2019.

53. Prasad S, diğerleri. 3D printing in dentistry. J. 3D Print. Med. 2018;2:89-91.

54. Nguyen T, Jackson T. 3D technologies for precision in orthodontics. Semin. Orthod. 2018;24:386-392.

55. AMFG. Application Spotlight: 3D Printing for Digital Dentistry & Clear Aligner Manufacturing. [Çevrimiçi] 2019. https://amfg.ai/2019/08/08/application-spotlight-3d-printing-for-digital-dentistry-clear-aligner-manufacturing/.

56. Peeters B, Kiratli N, Semeijn J. A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. J. Clean. Prod. 2019;241:118313.

57. Thakkar, D. Cytotoxicity of 3D Printed Materials: An In Vitro Study. Sri Ramakrishna Dental College and Hospital; 2019.

58. Jindal P, diğerleri. Mechanical behaviour of 3D printed vs thermoformed clear dental aligner materials under non-linear compressive loading using FEM. J Mech Behav Biomed Mater. 2020;112:104045.

59. Maspero C, Tartaglia GM. 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Where We Are and Where We Are Going. Materials. 2020;13:5204.

60. Edelmann A, diğerleri. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2020;158(5):e91-e98.

61. McCarty MC, diğerleri. Effect of print orientation and duration of ultraviolet curing on the dimensional accuracy of a 3-dimensionally printed orthodontic clear aligner design. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2020;158(5):889-897.

62. Jindal P, diğerleri. Effects of post-curing conditions on mechanical properties of 3D printed clear dental aligners. Rapid Prototyp J. 2020;26(11):1337-1344.

63. Ahamed SF, diğerleri. Cytotoxic evaluation of directly 3D printed aligners and Invisalign. Eur J Mol. 2020;7(6):1129-1140.

64. Ahn HW, Kim KA, Kim SH. A new type of clear orthodontic retainer incorporating multi-layer hybrid materials. The Korean Journal of Orthodontics. 2015;45(5):268-272.

65. Nasef AA, El-Beialy AR, Mostafa YA. Virtual techniques for designing and fabricating a retainer. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2014;146(3):394-398.

66. McKay A, McCray J, Bankhead B, Lee MM, Miranda G, Adel SM, Kim KB. Forces and moments generated during extrusion of a maxillary central incisor with clear aligners: an in vitro study. BMC Oral Health. 2023;23(1):495.

67. Tsai MT, Huang HL, Yang SG, Su KC, Fuh LJ, Hsu JT. Biomechanical analysis of occlusal modes on the periodontal ligament while orthodontic force applied. Clin Oral Investig. 2021;1-10.

68. Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. J Orofac Orthop. 2015;76(6).

69. Wiechens B, Brockmeyer P, Erfurth-Jach T, Hahn W. Force delivery modification of removable thermoplastic appliances using Hilliard precision thermopliers for tipping an upper central incisor. Clin Oral Investig. 2022;26(10):6105-6118.

70. Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glyc-olmodified clear aligners immersed in artificial saliva. Sci Rep. 2021;11(1):10052.

71. Atta I, Bourauel C, Alkabani Y et al. Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material). J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106337.

72. Yan Song MA, Fang DY, Zhang N, Ding XJ, Zhang KY, Bai YX. Mechanical properties of orthodontic thermoplastics PETG/PC2858 after blending. Chin J Dent Res. 2016;19:43-48.

73. Nowak CM, Othman A, Ströbele DA, von See C. Comparative mechanical testing for different orthodontic aligner materials over time - in vitro study. J Clin Exp Dent. 2022;14(6).

74. Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, Caprioglio A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. Materials. 2021;14(7):1799.

75. Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, Zou B. Advances in orthodontic clear aligner materials. Bioact Mater. 2023;22:384-403.

76. Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, Deregibus A. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023;24(1):2.

77. Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. Polymers. 2024;16(3):371.

78. Panayi NC. Directly printed aligner: Aligning with the future. Turk J Orthod. 2023;36(1):62.

79. Wang Q, Zhang J, Yao G, Lou W, Zhang T, Zhang Z, Lin Y. Effective Orthodontic Tooth Movement via an Occlusion-Activated Electromechanical Synergistic Dental Aligner. ACS Nano. 2023;17(17):16757-16769.

80. Koenig N, Choi JY, McCray J, Hayes A, Schneider P, Kim KB. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. Korean J Orthod. 2022;52(4):249.

81. Grant J, Foley P, Bankhead B, et al. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. Prog Orthod. 2023;24(1):23.