



Avrasya Üniversitesi
Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
2026, 1 (1)



Avrasya University
Science and Engineering Journal
2026, 1 (1)

Araştırma Makalesi/Research Article
[https://doi.org/dergipark.org.tr/xx2025, 1 \(1\), 17-39](https://doi.org/dergipark.org.tr/xx2025, 1 (1), 17-39)

E-ISSN:
Geliş / Received: 30. 09.2025
Kabul / Accepted: 08.01.2026

Diş Hekimliğinde Sonlu Elemanlar Analizi: Klinik ve Mühendislik Perspektifleri

Faezeh NADERLOU¹ , Ayşegül TÜRKSOY² , Sema Nur Sevinç GÜL³ 

Özet

Sonlu elemanlar analizi (FEA), diş hekimliğinde yaygın olarak benimsenen bir hesaplama yöntemi haline gelmiş ve ağız yapıları ile diş malzemelerinin biyomekanik davranışları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Başlangıçta mühendislik alanında geliştirilen FEA, karmaşık yükleme senaryolarının, malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının simülasyonunu mümkün kılmaktadır.

Bu derleme, hem mühendislik hem de klinik perspektiflerden dengeli bir genel bakış sunmaktadır. FEA'nın kullanımı restoratif malzemelerde stres dağılımı, sabit ve hareketli protezlerde yük transferi, ortodontik diş hareketinin biyomekaniği ve kök rezorpsiyonu riski, endodontik aletlerin kırılma direnci ve stresi, implant geometrisi, implant açılanmasını, periodontal kemik kaybının biyomekanik etkisini, periodontal ligamanın viskoelastik özelliklerini ve splintleme stratejilerini kapsar. Gelecekte FEA'nın klinik verilerle daha yakın entegrasyonu, hastaya özel simülasyonlar ve klinisyenler ile mühendisler arasında disiplinler arası iş birlikleri yer almaktadır.

Sonuç olarak; FEA, mühendislik mekaniği ile klinik diş hekimliği arasındaki boşluğu doldurarak tedavi planlaması için öngörü sunmaktadır. Daha gerçekçi modeller klinik karar alma süreçlerini ve hasta sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirebilir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, Biyomekanik, Diş hekimliği, Mühendislik, Hesaplamalı modelleme

Finite Element Analysis in Dentistry: Clinical and Engineering Perspectives

Abstract

Finite element analysis (FEA) is a computational method originally developed in engineering that has become widely applied in dentistry to investigate the biomechanical behaviour of oral tissues and dental materials. By simulating complex loading scenarios, material properties, and boundary conditions, FEA provides valuable insights into clinical situations characterized by heterogeneous tissues and variable occlusal forces.

Its applications in dentistry are broad, including analysis of stress distribution in restorative materials, load transfer in fixed and removable prostheses, biomechanics of orthodontic tooth movement, risk of root resorption, fracture resistance of endodontic instruments, evaluation of implant geometry and angulation, assessment of periodontal

¹ Diş Hekimi (Doktora Öğrencisi) Faezeh NADERLOU, Atatürk Üniversitesi/ Sağlık Bilimleri Enstitüsü/ Diş Hekimliği Fakültesi / Periodontoloji Anabilim Dalı, f.naderlo@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0003-7190-0700>.

² Diş Hekimi (Doktora Öğrencisi) Ayşegül TÜRKSOY, Atatürk Üniversitesi/ Sağlık Bilimleri Enstitüsü/ Diş Hekimliği Fakültesi / Periodontoloji Anabilim Dalı , aysegulturksoy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4055-0376>

³ Doçent Doktor Sema Nur Sevinç GÜL, Atatürk Üniversitesi/ Sağlık Bilimleri Enstitüsü/ Diş Hekimliği Fakültesi / Periodontoloji Anabilim Dalı , semanursevinc@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0699-917X>

bone loss, and modelling of periodontal ligament viscoelasticity and splinting strategies. These studies have contributed to a better understanding of how dental treatments interact with biological and mechanical systems.

The future of this field lies in bridging engineering mechanics and clinical practice through interdisciplinary collaboration, patient-specific simulations, and validation with clinical data.

Ultimately, FEA acts as a bridge between engineering and dentistry, supporting evidence-based treatment planning. The use of realistic and validated models holds significant potential for improving clinical decision-making and optimizing patient outcomes.

Keywords: Finite element analysis, Biomechanics, Dentistry, Engineering, Computational modeling

Giriş

Sonlu elemanlar analizi (FEA), mühendislik disiplininde doğmuş bir hesaplama yntemidir ve karmaşık yapılar zerinde kuvvet, gerilme ve deformasyon dağılımlarını incelemeye olanak tanır (Zienkiewicz vd., 2013). Diş hekimliği alanında bu yöntem, oral kavitenin biyomekanik açıdan son derece karmaşık yapısını anlamada önemli bir araç haline gelmiştir. Çiğneme kuvvetlerinin diş, periodontal destek dokuları ve restoratif materyaller üzerinde oluşturduğu etkilerin modellenmesi, klinik uygulamalar için değerli bilgiler sunmaktadır. Böylece mühendislik temelli bu analizler, klinik kararların bilimsel bir temele dayandırılmasına katkıda bulunmakta; mühendislik ve klinik bilimler arasında güçlü bir köprü kurulmasına olanak sağlamaktadır.

Bu alışma sistematik bir derleme olarak tasarlanmamıştır; diş hekimliğinde Sonlu Elemanlar Analizi ile ilgili güncel ve klinik açıdan ne çıkan çalışmaların seçilerek değerlendirildiği, seçilmiş literatüre dayalı bir anlatı derleme niteliğindedir. Literatür taraması ağırlıklı olarak PubMed, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında “sonlu elemanlar analizi”, “dental biyomekanik”, “implant”, “restoratif diş hekimliği”, “ortodonti”, “endodonti” ve “periodontoloji” anahtar kelimeleri kullanılarak yapılmıştır. Diş hekimliğinde FEA uygulamalarını konu alan, belirgin biyomekanik analiz içeren ve tam metnine erişilebilen İngilizce ve Türkçe makaleler gözden geçirilmiştir.

Çalışmaya FEA temelli biyomekanik modelleme içeren, klinik veya mühendislik açıdan yorum yapılabilen çalışmalar dahil edilmiştir.

Dışlama kriterleri ise řu şekilde belirlenmiştir:

1. FEA ile doğrudan ilişkisi olmayan biyomekanik alışmalar,
2. Yetersiz metodolojik açıklamaya sahip alışmalar,
3. Sadece hayvan çalışmaları olup klinik karşılığı bulunmayan raporlar,
4. Tekrarlı konferans zetleri veya erişilebilir tam metni olmayan yayınlar.

Bu yaklaşım, diş hekimliğinin farklı disiplinlerinde kullanılan FEA modellerinin ortak ilkelerini, klinik yansımalarını ve modern teknolojilerle entegrasyonunu karşılaştırmalı bir şekilde ortaya koymak amacıyla tercih edilmiştir.

Bu derlemenin amacı, sonlu elemanlar analizinin (FEA) diş hekimliğinde kullanımına ilişkin güncel biyomekanik yaklaşımları, mühendislik tabanlı modelleme stratejilerini ve klinik uygulamalarla ilişkili sonuçları disiplinler arası bir perspektiften incelemektir. Mevcut literatürde FEA alışmaları oldukça fazla olmakla birlikte, bu çalışmalar genellikle yalnızca belirli bir alan (implantoloji, ortodonti, restoratif diş hekimliği vb.) zerine odaklanmakta ve mühendislik modelleri ile klinik bulgular arasındaki ilişki bütüncül olarak ele alınmamaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli analizler, dijital ikiz uygulamaları, hasta-spesifik simülasyonlar ve gelişmiş doku modelleme teknikleri gibi modern yaklaşımlar hızla gelişmesine rağmen, bu

teknolojilerin klinik diş hekimliği pratiğine entegrasyonu konusunda literatürde belirgin bir boşluk bulunmaktadır. Bu alışma, hem mevcut bilgisayar destekli biyomekanik yöntemleri sistematik bir çerçevede özetlemeyi hem de bu yöntemlerin klinik karar verme süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini ortaya koyarak literatürdeki söz konusu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır.

1. Sonlu Elemanlar Analizinin Temel Prensipleri

FEA, alan niceliklerinin doğrusal veya polinom fonksiyonları kullanılarak mekansal olarak değiştiği diferansiyel denklemler veya integral ifadeler aracılığıyla yaklaşık olarak hesaplanarak saha problemlerini zmek için kullanılan sayısal bir tekniktir (Ryu vd., 2013). Bu yöntem, belirli sonuçlar için gerilmiş ve analiz edilmiş malzemelerin veya tasarımların bilgisayar modellerini oluşturmayı içerir ve uygulamaları yapısal, termal ve akışkan akışı analizlerini kapsar (Desai Shrikar & Shinde Harshada, 2012). Temel sonlu eleman tipleri arasında sabit gerinim üçgenler, doğrusal gerinim üçgenleri, çift doğrusal dikdörtgenler ve ikinci dereceden dikdörtgenler bulunur (Ryu vd., 2013). Matris sertlik yöntemlerini kullanan kesin çözümlerle FEA sonuçlarını karşılaştıran araştırmalar, eleman doğruluğunun yükleme koşullarına ve ağ inceltmesi gereksinimlerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Ryu vd., 2013). FEA, diş ve biyomedikal araştırmalar dahil olmak üzere çeşitli alanlarda devrim yaratmış, canlı dokularda gerilme ve gerinim hesaplamalarına ve klinik varsayımların doğrulanmasına olanak sağlamıştır (Desai Shrikar & Shinde Harshada, 2012). Yöntem, yalnızca temel matematik ve mekanik bilgisini gerektiren temel bir mühendislik analiz tekniği olarak hizmet vermektedir (Lepi, 1998). Bu süreç birkaç temel aşamadan oluşur:

2. Meshleme (Ağ Oluşturma)

Geometri, üç boyutlu hacimlerde tetrahedral veya hexahedral elemanlara bölünür. Klinik modellerde çoğunlukla tetrahedral mesh tercih edilir çünkü oral yapılar düzensiz ve karmaşıktır. Ancak hexahedral mesh, daha homojen sonuçlar verir ve özellikle düz geometrilere tercih edilir. Mesh yoğunluğu yani eleman sayısı arttıkça sonuçlar daha hassas olur fakat hesaplama maliyeti artar. Bu nedenle mühendislikte “mesh convergence” analizi yapılarak, eleman sayısı artırıldığında sonuçların ne ölçüde değiştiği test edilir (Zienkiewicz vd., 2013).

2.1. Malzeme zellikleri

FEA’da her eleman, belirli mekanik özelliklere sahip kabul edilir. Diş hekimliğinde kullanılan yapılar çok farklı özellikler gösterir: Mine: rijit, kırılğan, izotrop kabul edilir. Dentin: Daha elastik, genellikle izotrop kabul edilse de aslında hafıf anizotrop özellik taşır. Periodontal ligament (PDL): Çoğu çalışmada lineer elastik kabul edilse de gerçekte non-lineer ve viskoelastiktir. Bu, periodontoloji açısından modellemenin en kritik eksikliklerinden biridir. Kemik: Kortikal kemik yüksek elastik modüle sahip, trabeküler kemik ise daha süngerimsi ve düşük elastik modlldr. Genellikle izotrop kabul edilse de gerçekte anizotropik (yön bağımlı) zellik gösterir (Natali vd., 2004).

2.2. Sınır Koşulları

Modelin hangi bölgelerden sabitlendiğini ve nerelerden serbest bırakıldığını tanımlar. Örneğin mandibula modeli oluşturulurken kondil bölgeleri sabitlenebilir. Bu aşama, modelin gerçek hayattaki biyomekanik davranışını doğru şekilde yansıtabilmesi için kritik öneme sahiptir. Yanlış sınır koşulları, sonuçları klinikle uyumsuz hale getirebilir (Geng vd., 2001).

2.3. Yükleme Senaryoları

FEA’da kuvvetler belirli bir büyüklük, yn ve süre ile uygulanır.

Statik analiz: Tek bir kuvvetin etkisi altında sistemin tepkisini inceler. Örneğin implant zerine 100 N dikey kuvvet uygulamak.

Dinamik analiz: Zamanla değişen kuvvetleri hesaba katar. Çiğneme döngüsünün veya parafonksiyonel alışkanlıkların modellenmesi buna örnektir.

Lineer analiz: Kuvvet ile deformasyon arasında orantılı bir ilişki kabul eder.

Non-linear analiz: Büyük deformasyonlar, plastik davranış veya temas problemlerini hesaba katar. rnek olarak PDL'nin viskoelastik davranışını modellemek için gereklidir (Ausiello vd., 2011).

2.4. zmlleme ve Sonuçların Yorumu

zm sonrasında elde edilen en sık kullanılan parametrelerden biri von Mises stres dağılımıdır. Bu, malzeme veya dokuların dayanım sınırlarını aşabilecek bölgeleri gösterir. Klinik açıdan, bu bölgeler implant başarısızlığının, kök rezorpsiyonunun veya restoratif materyal kırılmasının potansiyel olarak başlayabileceği alanları temsil eder (Geng vd., 2001; Geramy&Morgano,2004).

FEA'nın en büyük avantajı, klinikte doğrudan gözlemlenemeyen biyomekanik olayları görünür kılmasıdır. Bununla birlikte, biyolojik dokuların heterojen ve dinamik doğası, modellenirken çoğunlukla basitleştirilmektedir. Örneğin, PDL'nin lineer elastik kabul edilmesi sonuçları klinikten uzaklaştırılabilir (Natali vd., 2004). Ayrıca kemik yoğunluğu, çiğneme kuvveti varyasyonları gibi hasta bazlı farklılıklar modellere genellikle yansıtılamamaktadır (Natali vd, 2009; Ausiello vd, 2011).

3. Diş Hekimliğinde Sonlu Elemanlar Analizi Uygulama Alanları

FEA klinik kararları desteklemek, tedavi planlaması ile beraber sonuçları optimize etmek, oluşabilecek komplikasyonları azaltmak yeni materyal ve tekniklerin geliştirilmesini hızlandırmak amacıyla diş hekimliğinin birçok alanında kullanılmaktadır (Lahoud vd., 2024). Restoratif diş hekimliğinde kullanılan kompozit rezin, seramik, amalgam gibi materyallerin çiğneme kuvvetleri altındaki dayanıklılığı, kavite tasarımlarının biyomekanik sonuçları ve adeziv bağlantı bölgelerindeki stres dağılımı (Fidancıoğlu vd., 2025; Ouldyerou vd., 2023; Alp vd., 2020); Protetik diş hekimliğinde sabit ve hareketli protezlerin dayanıklılığı, bağlantı elemanlarının yük aktarımı ve implant destekli protezlerdeki kuvvet dağılımları; Ortodontide diş hareketleri sırasında periodontal dokulara iletilen kuvvetlerin analizi ve braket–ark teli tasarımlarının optimizasyonu; Endodontide kök kanal dolgularının, post ve kor sistemlerinin kırılma dirençlerinin modellenmesi; İmplantoloji alanında implant–kemik arayüzünde stres dağılımlarının incelenmesi ve farklı implant tasarımlarının biyomekanik açıdan değerlendirilmesi; Periodontolojide ise alveol kemiği ve periodontal dokular üzerine uygulanan farklı tedavi yöntemlerinin biyomekanik etkilerinin değerlendirilmesiyle klinik olarak doğrudan ölçülmesi zor olan karmaşık biyomekanik süreçleri aydınlatmakta ve hasta odaklı tedavi planlamasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar analizinin doğruluğu ve klinik olarak yorumlanabilirliği, modellemede kullanılan mühendislik stratejilerine doğrudan bağlıdır. Diş hekimliğinde biyomekanik simülasyonların güvenilir olabilmesi için öncelikle model geometrisinin uygun şekilde ağ (mesh) yapısına dönüştürülmesi gerekmektedir. Mesh yoğunluğu, elde edilen sonuçların hassasiyetini belirleyen temel unsurlardan biridir. Periodontal ligament gibi ince ve biyomekanik açıdan karmaşık bölgelerde daha yüksek çözünürlüklü bir ağ yapısı gerekirken, kortikal kemik gibi daha homojen yapılar da daha geniş elemanlar yeterli olabilmektedir (Geng vd., 2001; Duprez vd., 2020). Bu nedenle mesh tasarımındaki mühendislik yaklaşımı, simülasyonun klinik gerçekliğini doğrudan etkiler.

Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması da büyük önem taşır. Diş, periodontal ligament, kortikal kemik, trabeküler kemik ve restoratif materyaller birbirinden oldukça farklı mekanik davranış sergilemektedir. Örneğin periodontal ligament doğrusal elastik olmayan, nonlineer ve viskoelastik bir yapı gösterirken (Toms & Eberhardt, 2003; Su & Chang, 2010), kortikal kemik anisotropiktir ve yönlere göre farklı elastik modüller sergiler. Restoratif materyallerde ise zirkonya, seramik ve kompozit gibi materyaller arasında belirgin elastik modül farklılıkları bulunmaktadır (Ausiello vd., 2011; Chen vd., 2024; Tomm vd., 2023). Bu özelliklerin modele doğru şekilde yansıtılması, elde edilen gerilme ve deformasyon sonuçlarının klinik açıdan anlamlı olmasını sağlar.

Analizde kullanılan sınır koşulları ve yükleme tipleri de sonuçları belirleyen kritik faktörlerdir. Eksensel, oblik veya dinamik çiğneme kuvvetlerinin büyüklüğü, yönü ve uygulama süresi, elde edilen stres dağılımlarını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu nedenle gerçek çiğneme fonksiyonunun temsil edildiği yükleme senaryolarının kullanılması, FEA modellerinin klinik senaryoları daha doğru yansıtmasına yardımcı olur (Glantz vd., 1993; Mericske-Stern vd., 1996). Klinik bir durumu temsil etmeyen yapay yükleme koşulları ise sonuçların yorumlanmasını güçleştirebilir.

FEA'nın güvenilirliğini artıran bir diğer unsur model doğrulamasıdır. Fotoelastik analiz, strain gauge ölçümleri veya in vivo veriler gibi yöntemler, modelin gerçek biyomekanik davranışı ne kadar doğru yansıttığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte her doğrulama yönteminin belirli sınırlılıkları bulunmaktadır. Örneğin fotoelastik analiz yalnızca yüzey gerilmelerini gösterebilmekte, derin dokulardaki stres dağılımını tam olarak yansıtamamaktadır (Frocht, 1962; Celik & Uludağ, 2007; Zak, 1935). Bu nedenle mühendislik temelli doğrulama stratejileri ile klinik verilerin birlikte değerlendirilmesi önem taşır.

Sonuç olarak, FEA'dan elde edilen stres, deformasyon veya yer değiştirme değerleri, ancak mühendislik prensipleri ile klinik biyomekanik bilgilerin birlikte yorumlanması durumunda anlam kazanır. İmplant-kemik arayüzünde gözlenen stres artışı, restorasyonların kırılma riski, ortodontik kuvvetlerin periodontal dokulara etkisi gibi parametreler, teknik birer ölçüm olmanın ötesinde doğrudan klinik sonuçlara işaret etmektedir (Cehrelı vd., 2005; İbrahim vd., 2024). Bu nedenle mühendislik tabanlı FEA modellerinin doğru şekilde oluşturulması, diş hekimliğinde karar verme süreçlerinin bilimsel temellerle desteklenmesini sağlar ve çalışmanın multidisipliner değerini güçlendirir.

Tablo 1: Diş Hekimliğinde FEA Uygulama Alanlarının Klinik ve Biyomekanik Açından Özeti

Uygulama Alanı	FEA'nın İncelediği Biyomekanik Parametreler	Temel Bulgular	Klinik Yansımalar
İmplantoloji	İmplant-kemik arayüzü stresleri, platform switching, bağlantı tipi, implant açısı, çap/uzunluk, All-on-4/All-on-5 biyomekaniği	Marjinal kemik kaybı stres artışıyla ilişkili; distal implant açısı yük dağılımını değiştiriyor; zirkonya–titanyum farkları belirgin	İmplant seçimi, yerleşim açısı ve bağlantı tipi daha öngörülebilir belirlenir; yüksek riskli bölgelerde kuvvet yönetimi optimize edilir
Protetik Restorasyonlar	Onlay, inley, veneer, kuron ve köprülerde stres dağılımı; materyal elastik modülü; kalınlık etkisi	Zirkonya ve lityum disilikat düşük stres birikimi ile avantajlı; kompozitlerde gerilme daha yüksek	Materyal seçimi yapılırken kırılma riski daha doğru öngörülür; minimal invaziv preparasyon kararları desteklenir

Ortodonti	PDL stresleri, kök rezorpsiyonu risk bölgeleri, ankraj kontrolü, aligner kalınlığı/stiffness	Kötü periodontal desteği olan dişlerde kuvvet dozajı azaltılmalı; aligner kalınlığı ekspansiyon verimini değiştiriyor	Kuvvet dozajlaması kişiselleştirilir; rezorpsiyon riski olan hastalarda güvenli hareket planlanır
Periodontoloji	Alveoler kemik kaybı sonrası stres artışı; splint biyomekaniği; intrüzyon kuvvetlerinin etkisi	Her 1 mm kemik kaybında intrüzyon kuvveti ~%8–9 azaltılmalı; splint stres dağılımını dengeliyor	Periodontal destek kaybı olan hastalarda kuvvet yönetimi optimize edilir; splint kararı daha bilimsel temele oturur
Endodonti	Kanal şekillendirme sırasında dentin stresleri; eğe tasarımıının kök çatlaklarına etkisi	Continuous wave tekniği daha yüksek stres oluşturabilir; eğe taper'ı kök yüzey streslerini belirgin etkiler	Kök kırığı riskinin azaltılması için eğe seçimi ve obturasyon tekniği optimize edilir
Protez – Hareketli Protezler	HPP ve implant destekli protezlerde dokular arası yük dağılımı	Distal uzantılarda abutment dişlerde kritik stres artışı; implant eklenmesi pseudo–Kennedy sınıf III etkisi yaratıyor	Tasarım stratejileri (RPI, implant destekli HPP) yükleri dengeler; rezorpsiyon ve abutment kaybı riski azalır

3.1 Restoratif Diş Hekimliği

Restoratif diş tedavisinde FEA, diş ve restorasyonun mekanik davranışlarını dijital ortamda inceleyerek mühendislik ve klinik açıdan önemli katkılar sunmaktadır. Bilgisayar tabanlı modeller, farklı materyal ve tasarımların diş dokusu üzerindeki gerilme dağılımını öngörmekte, restorasyonların dayanıklılığını artırmaya yönelik veriler sağlamaktadır (Reddy vd., 2021). Restoratif materyallerin elastikiyet modülü ve yapısal özellikleri, stresin dağılımını doğrudan etkilemektedir. FEA alışmaları, kompozit rezinlerin polimerizasyon büzülmesi ve düşük elastik modülü nedeniyle daha yüksek i gerilme ve cusp esnemesine yol açtığını; buna karşılık seramik ve metal esaslı materyallerin yükleri daha dengeli dağıtarak stres yoğunlaşmasını azalttığını göstermiştir (Bansal vd., 2024; Tavangar vd., 2025).

Restoratif materyallerin çiğneme kuvvetleri altındaki mekanik davranışları, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) kullanılarak yapılan çalışmalarla ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. FEA bulguları, amalgamın rijit yapısı nedeniyle uygulanan yükleri restorasyon içinde absorbe ederek en düşük stres değerlerini gösterdiğini; kompozit ve cam karbomer materyallerin ise daha düşük elastik modül nedeniyle daha fazla deformasyon ve stres birikimine neden olduğunu ortaya koymaktadır (Ouldyerou vd., 2023). Class II MOD kavitelerde kompozitlerde gözlenen daha yüksek gerilme yoğunluğu ile adeziv ara yüzlerin kritik öneme sahip olduğu doğrulanmıştır (Alp vd., 2020). Buna karşılık, zirkonya ve preslenmiş seramik materyallerin FEA simülasyonlarında kompozitlere göre çok daha düşük stres değerleri sergilediği ve yüksek oklüzal yükler altında daha avantajlı olduğu gösterilmiştir (Pable vd., 2025). Klinik gözlemlerle uyumlu şekilde, küçük ve orta kavitelerde kompozit restorasyonlar diş bütünlüğünü koruyarak fonksiyonel yükleri tolere edebilmekte; buna karşın büyük madde kaybı olan vakalarda zirkonya ve lityum disilikat gibi yüksek elastik modüllü seramiklerin stres dağılımını optimize ederek kırılma riskini azalttığı bildirilmiştir (Park vd., 2008; Ugurlu & Sari, 2022; Pereira vd., 2019; Di Francesco vd., 2025).

FEA ayrıca CAD/CAM materyallerde tasarım optimizasyonuna da rehberlik etmektedir. Özellikle kron kalınlığı azaldıkça kırılma direncinin düştüğü; zirkonyanın daha ince kesitlerde dahi yüksek dayanım gösterdiği, lityum disilikatta ise yeterli kalınlık bırakılmasının kritik olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, minimal preparasyon stratejilerinde malzeme ve geometrinin FEA destekli planlamayla belirlenmesinin restoratif başarıya önemli katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Jurado vd., 2022; Tomm vd., 2023; Chen vd., 2024).

3.1. Protetik Diş Hekimliği

Protetik diş hekimliğinde FEA, protezlerin biyomekanik davranışlarını incelemeye ve klinik başarısını artırmada kritik bir araçtır. FEA sayesinde sabit ve hareketli protezlerde destek dişler, implantlar ve alveoler kemik üzerindeki yük dağılımı üç boyutlu olarak modellenenebilir. Böylece kullanılan materyallerin mekanik özellikleri, bağlantı tipleri ve tasarım farklılıklarının periodontal dokularla etkileşimi öngörülerek tedavi planlaması optimize edilir (Schmid, Strasser, & Rosentritt, 2023; Coelho vd., 2021). Mühendislik açısından bu yaklaşım, abutment dişlerde aşırı yüklenmeyi engelleyip kemik rezorpsiyonu riskini azaltırken; klinik açıdan protez kaynaklı komplikasyonları en aza indirmeye katkı sağlar.

Destek dokulara aktarılan yüklerin dengeli olması, protezlerin uzun dönem başarısının temelini oluşturur (Ichikawa vd., 2023). Sabit protezlerde yükler PDL aracılığıyla kontrollü şekilde iletilirken, hareketli protezlerde periodontal dokular ile alveoler mukoza arasındaki esneklik farkı yk dağılımında dengesizlik yaratabilir. Nitekim sabit protezlerde dişler yaklaşık 0,2 mm kadar yer değiştirebilirken, mukoza altında bu değer 2 mm'ye kadar çıkabilmektedir (Ochoa-Escate vd., 2025). Bu fark, sabit protezlerin yükleri daha eksenel ve fizyolojik biçimde aktarmasını sağlarken, hareketli protezlerde rotasyon ve rezorpsiyon riskini artırır. FEA alışmaları ayrıca köprülerde altyapı materyali veya tasarımın değiştirilmesinin abutment dişler ve evre kemikteki stres dağılımını önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymaktadır (Xu & Li, 2021).

Hareketli parsiyel protezlerde (HPP) yük aktarımı, protezin hem doğal dişlerden hem de rezidüel alveol kretinden destek alması nedeniyle karmaşık bir biyomekanik davranış sergiler. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile yapılan çalışmalar, özellikle distal uzantılı protezlerde abutment diş etrafında dönme momentleri oluştuğunu ve kret üzerinde yüksek stres birikimi meydana geldiğini göstermektedir. Bu nedenle tasarım stratejileri kritik öneme sahiptir. FEA bulguları, RPI gibi biyomekanik prensiplere dayalı tasarımların protezin kontrollü hareketini sağlayarak abutment dişe iletilen zararlı kuvvetleri azalttığını doğrulamaktadır (Chen & Wang, 2024). Benzer şekilde implant destekli protezlerde, distal serbest sonlu bölgelerde implant eklenmesiyle protezin pseudo-Kennedy sınıf III konfigürasyonuna dönüşmesi, FEA modellerinde daha dengeli stres dağılımı ile ilişkilendirilmiş ve kret rezorpsiyonunu sınırladığı bildirilmiştir (Ichikawa vd., 2023). Klinik açıdan sabit protezler periodontal sağlık açısından genellikle daha avantajlı kabul edilse de, abutment dişlerde plak birikimi ve gingival inflamasyonun arttığı gösterilmiştir. Sabit köprü taşıyan dişlerde, kontrol dişlere kıyasla daha yüksek plak ve diş eti indeksi ile daha derin periodontal cepler bildirilmiştir (Al-Sinaidi & Preethanath, 2014). HPP'lerde ise kroşe ve ataman bölgeleri plak retansiyonu için riskli alanlar olup gingivitis ve periodontitis gelişimine katkıda bulunabilir (Dula vd., 2015; Abouzeid vd., 2023). Ayrıca kötü planlanmış protezlerde abutment dişler aşırı lateral yükler nedeniyle periodontal liflerin gevşemesi ve mobilite artışı gösterebilir. İyi tasarlanmış protezlerde mobilite artışı gözlenmese de, HPP kullanılan abutmentlerin çekim riskinin daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Drummond vd., 2024).

FEA protez tasarımında yalnızca mühendislik temelli optimizasyon sağlamaz; aynı zamanda periodontal sağlık ve uzun vadeli klinik başarı açısından da yol gösterici olur. Sabit ve hareketli protezlerde destek dokuların biyomekanik yüklenme farklılıklarını ortaya koyarak, hem

materyal hem de tasarım seçiminde kanıta dayalı karar vermeyi mümkün kılar.

3.2. Ortodontik Diş Hekimliği

FEA, kraniyofasiyal büyüme ve gelişimde morfometrik değişikliklerin incelenmesinde vazgeçilmez bir yöntemdir. Ayrıca farklı mini vida materyallerinin ve yerleştirme açılarının oluşturduğu stres seviyelerini karşılaştırarak stabilite ve biyomekanik performans hakkında değerli bilgiler sunar (Takeshita vd., 2001). Ortodontik biyomekanik süreçlerde de FEA önemli bir araçtır; üç boyutlu kuvvet ölçümleri, lingual ortodonti sistemleri, büyüme modülasyonu ve miyofonksiyonel tedaviler bu yöntemle kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir (Cattaneo & Cornelis, 2021).

Ortodontik tedavide braket ve teller aracılığıyla iletilen kuvvetler periodonsiyum üzerinde biyolojik yanıt başlatır. Bu süreçte PDL, alveoler kemik ve kök yüzeyi üzerine düşen streslerin dengeli olması tedavi başarısı ve periodontal sağlığın korunması açısından kritiktir. FEA, diş ve evre dokuların üç boyutlu modellerinde farklı kuvvet sistemlerini simüle ederek klinikte doğrudan gözlenemeyen biyomekanik tepkileri görünür hale getirir (Singh & Kambalyal, 2016; Rajgopal, 2018). Tipping hareketlerinde servikal bölgelerde daha yoğun stres, translasyonel hareketlerde ise daha dengeli bir dağılım olduğu gösterilmiştir (Tanne vd., 1987; Cattaneo & Cornelis, 2021). Ayrıca düşük kemik yoğunluğuna sahip bireylerde aynı kuvvetin %50–60 daha yüksek stres oluşturması, hasta özelinde kuvvet ayarlamasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Kuc vd., 2025; Rastegari & Hosseini, 2020).

Kök rezorpsiyonu, ortodontik kuvvetlerin en önemli biyolojik sonuçlarından biridir. FEA alışmaları, özellikle intrüzyon kuvvetlerinde rezorpsiyon riskinin arttığını ve periodontal ligamentte 4.7 kPa üzerindeki hidrostatik basınç alanlarının rezorpsiyon bölgeleriyle çakıştığını göstermiştir (Roscoe vd., 2021). Bu bulgu, mekanik parametrelerin doğru seçilmesinin biyolojik öngörüler için kritik olduğunu vurgular (Gandhi & Singh, 2017).

FEA, farklı aparey tipleri ve ligasyon yöntemlerinin biyomekanik etkilerini de incelemektedir. Elastomerik zincirlerin başlangıçta yüksek kuvvet üretilip hızla düşmesi, PDL’de hiyalinizasyon ve rezorpsiyon riskini artırabilirken, nikel-titanyum coil yayların daha sabit kuvvet profili sunduğu gösterilmiştir (Elshazly & Bourauel, 2022). Ayrıca “figure-of-eight” ligatrn stres dağılımını dengeleyerek ankraj direncini artırdığı bildirilmiştir (Bi & Guo, 2022).

FEA, ortodontide mühendislik ve klinik arasında köprü işlevi görmektedir. Mühendislik boyutunda kuvvet sistemlerini ayrıntılı çözümleyerek tedavi planlamasını desteklerken; klinik boyutta bireyselleştirilmiş kuvvet seçimi, kök rezorpsiyonunun önlenmesi ve periodontal sağlığın korunmasına katkı sağlar (Cattaneo & Cornelis, 2021; Roscoe vd., 2021).

3.3. Endodontik Diş Hekimliği

FEA, endodontik diş hekimliğinde stres dağılımı ve kırık direncini incelemeye günümüzde temel bir yöntemdir. Endodontik tedavi görmüş dişlerde gerilim dağılımı ve farklı tedavi yaklaşımlarının kırık direncine etkisi sayısal olarak modellenenebilir. Güncel meta-analizler, FEA rehberli planlamaların geleneksel yöntemlere kıyasla stres dağılımını iyileştirdiğini ve kırılma riskini azalttığını göstermektedir (Abdelhafeez, 2024). Kanal preparasyonunda dentin miktarı kritik rol oynamaktadır; geniş ve konik preparasyonların kalan dentinde daha yüksek stres oluşturduğu, minimal invaziv yaklaşımların ise bütünlüğü koruduğu bildirilmiştir (Mohanty vd., 2024). Farklı dolgu teknikleri karşılaştırıldığında, örneğin sürekli dalga kompaksiyon yönteminin kök ucunda daha yüksek gerilim oluşturabildiği, ancak doğru uygulandığında dentin kırılma eşiğini aşmadığı grlmştir (Fakhr & Elmesellawy, 2023). Bu bulgular, klinikte aşırı g uygulamasından kaçınma gibi güvenli tedavi ilkelerine bilimsel dayanak sağlar.

FEA'nın mühendislik katkıları, tedavi sonrası dişlerin dayanıklılığını artıracak materyal ve tasarımların geliştirilmesini de mümkün kılar. Micro-CT veya CBCT verileri kullanılarak gerçekçi diş geometrileri elde edilebilir; mine, dentin ve periodontal dokuların farklı mekanik özellikleri modele eklenerek gerçeğe yakın simülasyonlar yapılır (Trivedi, 2014). Bu sayede post-kor yapıları, kron veya endokron restorasyonların kırık direnci karşılaştırılabilir ve ferrl etkisi gibi biyomekanik kavramlar sayısal olarak doğrulanabilir (Wang & Chen, 2024). Nitekim güncel analizler, FEA tabanlı planlamaların kök kırığı riskini belirgin biçimde azalttığını rapor etmiştir (Abdelhafeez, 2024).

Endodontide bir diğer kritik alan, döner nikel-titanyum (NiTi) aletlerin stres analizi ve kırılma riskidir. Yüksek esnekliklerine rağmen bu aletler özellikle eğimli kanallarda kırılma riski taşır. FEA, alet geometrisi üzerinde stres yığılmalarını belirleyerek en zayıf noktaları saptar. alışmalar, enine kesit şeklinin stres dağılımını önemli ölçüde etkilediğini; örneğin üçgen uçlu, eksantrik dikdörtgen gövdeli eğelerin daha düşük stres birikimiyle daha güvenli performans sergilediğini göstermiştir (Galal vd., 2025). Bu tür bulgular, klinisyenlere güvenli alet seçimi konusunda rehberlik eder.

Mühendislik boyutunda, FEA sayesinde farklı eğe tasarımları CAD ortamında modellenip bükülme ve burulma yükleri altında test edilebilir. NiTi alaşımının faz dönüşümleri de modele entegre edilerek sıcaklık koşullarındaki davranışı incelenir. Böylece prototip üretimine gerek kalmadan kesit geometrisi, koniklik veya ısıl işlem yöntemleri ayrı ayrı değerlendirilebilir (Trivedi, 2014). Örneğin bir tasarım değişikliğiyle maksimum stresin %10 azaltıldığı sanal ortamda tespit edilirse, üretim aşamasına geçmeden daha güvenli bir model geliştirilebilir. Bu yaklaşım, endodontik aletlerin AR-GE sürecine doğrudan katkı sağlamakta, klinikte daha dayanıklı ve güvenli eğelerin kullanımına imkân tanımaktadır (Wang & Chen, 2024; Galal vd., 2025).

3.4. İmplantolojide Sonlu Eleman Analizi

FEA, implantolojide biyomekanik davranışın anlaşılması ve implant tasarımlarının değerlendirilmesi için yaygın kullanılan bilgisayar destekli bir mühendislik aracıdır. Son yıllarda yapılan alışmalar, FEA'nın yük aktarımı, gerilim dağılımı ve yer değiştirme gibi parametreleri öngörmede yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir (Wang & Chen, 2024; Falcinelli vd., 2023). Böylece FEA, implant ve protez üstyapılarının tasarım optimizasyonu ile klinik planlamasında kritik rol oynar (Wang & Chen, 2024).

İmplant apı ve boyu, peri-implant kemikte gerilim dağılımını doğrudan etkiler. Çapın artırılması yükün daha geniş alana yayılmasını sağlayarak kortikal kemikte stres yoğunluğunu azaltır (Eazhil vd., 2016; Lee vd., 2021). Özellikle düşük yoğunluklu kemikte dar çaplı implantların yol açtığı yüksek stres rezorpsiyon riskini artırır (Lee vd., 2022). İmplant boyu ise temas yüzeyini artırabilir, ancak uzatma her zaman ek fayda sağlamaz; bazı durumlarda tork ve gerilim birikimi artabilir. Bu nedenle FEA, aşırı uzunluk yerine optimal boy ve yeterli çap kombinasyonunun en güvenli seçenek olduğunu göstermektedir (Naguib vd., 2023).

Açılı implantlar anatomik kısıtlılıklarda sıkça tercih edilir. Ancak FEA, açılı yerleştirmenin özellikle kortikal kemikte daha yüksek von Mises gerilimlerine yol açabileceğini göstermiştir (Wu vd., 2020; Ibrahim vd., 2024). Eğim arttıkça stres yoğunluğu artar; bu nedenle aının mümkün olduğunca düşük tutulması önerilir. All-on-4 konseptinde yaygın kullanılan 30–45° distal implantlar, marjinal kemik kaybı riskini azaltmak için kontrollü yükleme ile desteklenmelidir. FEA ayrıca düşük yoğunluklu kemikte açılı implant performansını öngörerek cerraha greft ihtiyacı ve implant yeri seçimi konusunda rehberlik eder (Lee vd., 2022).

All-on-4, anterior dikey ve posterior açılı dört implantla tam ark sabit protez desteği sağlar (Malo vd., 2011). FEA, bu konseptte yükün özellikle arka implantlarda yoğunlaştığını ve distal

kortikal kemikte stres artışı oluşturduğunu göstermektedir (Pandey vd., 2023). Wu vd. (2020) implant makro-tasarımından ziyade yk konumunun belirleyici olduğunu bildirmiştir. Stres azaltmada implant açısı ve antero-posterior yayılımın optimize edilmesi en kritik faktördür (Sun vd., 2023; Sevinç Gül vd., 2025).

All-on-6 modelinde ise stresin daha geniş alana dağıldığı ve maksimum kortikal gerilimin belirgin şekilde azaldığı rapor edilmiştir (Pandey vd., 2023; Montero vd., 2022). Bu nedenle yeterli kemik varlığında daha fazla implant kullanımı avantajlıdır. Ancak All-on-4 protokolü de uzun dönem yüksek başarı oranlarıyla etkinliğini kanıtlamıştır (Sharaf vd., 2023).

FEA, alternatif implant materyallerini de değerlendirmektedir. Örneğin All-on-4 sisteminde zirkonya implantların titanyuma göre daha az stres oluşturduğu bildirilmiştir (Ansari vd., 2021). Köprü altyapısında kullanılan materyaller de yk paylaşımını etkiler; titanyum bar, kobalt-krom veya fiber destekli kompozitler arasında esneklik modülüne bağlı farklı sonuçlar gözlenmiştir (Güzelce, 2023).

İmplant-kemik ve implant-abutment arayüzlerinin analizi de önemlidir. Osseointegrasyon yüzdesi arttıkça evre kemikteki stres azalmaktadır (Alemayehu vd., 2024). Bağlantı tipleri arasında i konik bağlantıların mikro-gap oluşumunu en aza indirdiği rapor edilmiştir (Lee vd., 2021). Yumuşak doku bariyeri de FEA ile modellenilebilmekte; platform-switching veya zirkonyum abutment kullanımının mukozal stres dağılımı ve hücre adezyonu açısından avantaj sağladığı gösterilmiştir (Rodriguez-Ciurana vd., 2018; Zhlke vd., 2021).

İmplant-kemik arayüzünün biyomekaniğini değerlendirmeye ek olarak, FEA implant üstü protetik restorasyonların stres dağılımını incelemede de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sabit implant üstü protezlerde framework materyali, bağlantı tipi ve yükleme yönü gibi faktörlerin kemik ve implant bileşenleri üzerindeki gerilme değerlerini önemli ölçüde etkilediği bildirilmiştir. alışmalar, farklı bağlantı tasarımlarının (internal–external bağlantılar), implant çaplarının ve abutment konfigürasyonlarının stres transferini belirgin şekilde değiştirdiğini göstermiştir (Lee vd., 2021; Lee vd., 2022; Abraham vd., 2014; Wang vd., 2023). Ayrıca fotoelastik ve FEA karşılaştırmalı çalışmalar, implant destekli köprülerde kantilever uzunluğunun ve framework materyalinin yük aktarım mekanizması üzerinde kritik rol oynadığını doğrulamaktadır (Assif vd., 1996; Markarian vd., 2007). Bu bulgular, implant üstü restorasyonlarda materyal ve tasarım seçiminin uzun dönem biyomekanik başarının belirleyicilerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

FEA modellerine kemik remodeling algoritmaları entegre edilerek uzun vadeli kemik yoğunluğu değişimleri öngörülebilmektedir (Poovarodom vd., 2024). Ayrıca fonksiyonel dereceli malzemeler kullanılan implantların stres azaltıcı etkileri rapor edilmiştir (Rajaeirad vd., 2024). Bu bulgular, biyoyumlu tasarımların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Chen vd., 2023). Son literatürler, FEA'nın implant başarısını artırmada vazgeçilmez bir yöntem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Falcinelli vd., 2023; Wang & Chen, 2024).

3.5. Periodontoloji ve Sonlu Elemanlar Analizi

FEA, periodontal dokuların destek düzeyine göre fonksiyonel yüklerin nasıl dağıldığını ortaya koymada en güçlü yöntemlerden biridir. Oklüzal kuvvetlerin sağlıklı ve destek kaybı olan dişler üzerindeki etkilerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda, periodontal destek azaldıkça gerilimin özellikle PDL ve kök yüzeylerinde yoğunlaştığı gösterilmiştir (Agrawal vd., 2021). Bu bulgu, periodontal hastalık nedeniyle alveoler kemik yüksekliği azaldığında dişin fizyolojik yk toleransının düştüğünü ve mobilite riskinin arttığını sayısal olarak ortaya koymaktadır.

Klinik açıdan, destek kaybının arttığı vakalarda oklüzal düzenlemelerin yapılması, aşırı yükten kaçınılması ve tedavi planlamasında kuvvetlerin azaltılması gerektiği vurgulanmaktadır. Mühendislik perspektifinden bakıldığında ise, bu modeller stres transfer mekanizmalarının

hangi bölgelerde yoğunlaştığını göstererek, hem restoratif hem de ortodontik planlamada kritik eşikleri tanımlamaya yardımcı olmaktadır (Oishi & Nozaki, 2015; Sioustis vd., 2021). Ayrıca intrüzyon ve retraksiyon kuvvetlerinin destek düzeyi ile birlikte nasıl değiştiğini inceleyen modellerde, kemik kaybı arttıkça direncin merkezi (axis of resistance) yer değiştirmekte ve uygulanan kuvvetin etkisi değişmektedir (Gameiro vd., 2021). Benzer şekilde, periodontitisli vakalarda intrüzyon sırasında güvenli kuvvet düzeylerinin çok daha düşük tutulması gerektiği FEA ile belirlenmiştir (Minch & Sarul, 2021). Bu sayısal bulgular, klinisyene kuvvet dozajının bireyselleştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Daha ileri düzeyde, stres ve gerilimin dişin i yüzeylerinde yoğunlaşarak internal rezorpsiyon riskini de artırabileceği rapor edilmiştir (Moga & Delean, 2023). Dolayısıyla FEA yalnızca kemik kaybını değil, dişin kendi biyomekanik güvenliğini de öngörmede kritik rol oynamaktadır.

Periodontal ligamentin biyomekanik davranışını doğru modellemek, FEA'nın güvenilirliği açısından belirleyicidir. PDL'nin yalnızca elastik değil, viskoelastik ve sıvı dinamikleriyle ilişkili bir yapı olduğu, bu nedenle lineer elastik modellerin gerçek biyomekaniği yansıtmada yetersiz kaldığı pek çok çalışmada gösterilmiştir (Toms & Eberhardt, 2003; Su & Chang, 2010).

PDL'nin viskoelastik davranışını tanımlayan modeller, yükleme-boşalma döngülerinde gerçeğe daha yakın mobilite değerleri sağlamaktadır. Özellikle uzun süreli kuvvet uygulamalarında creep ve stress-relaxation gibi zaman bağımlı özelliklerin modele dahil edilmesi, klinikte gözlenen diş hareketlerini daha doğru öngörmektedir (Wang & Akbari, 2015; Wang & Du, 2018). Ayrıca PDL içindeki sıvı hareketlerinin de mobiliteye katkıda bulunduğu, hidrodinamik parametrelerin modellere eklenmesiyle doğrulanmıştır.

Mühendislik açıdan bu durum, simülasyonlarda kullanılan malzeme parametrelerinin doğruluğunun sonuçların geçerliliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Hohmann & Kober, 2011). Klinik açıdan ise ortodontik kuvvetlerin periodontal olarak zayıflamış vakalarda çok daha düşük seviyelerde uygulanması gerektiğine dair biyomekanik dayanak sağlamaktadır (Roscoe & Cattaneo, 2015).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda ayrıca sınır koşullarının ve başarısızlık kriterlerinin seçiminin de büyük rol oynadığı, Tresca ve Von Mises gibi kriterlerin PDL biyomekaniğini daha güvenilir şekilde yansıttığı ortaya konmuştur (Moga & Olteanu, 2024).

FEA, periodontal destek kaybına bağlı mobilite yaşayan dişlerde splintleme endikasyonunun belirlenmesinde de önemli bir araçtır. Alveoler kemik rezorpsiyonu farklı seviyelerde modellendiğinde, oblik yükleme altında özellikle PDL–dentin arayüzünde yüksek stres değerlerinin olduğu ve bu durumun dişin mobilitesini artırdığı gösterilmiştir. Bu bulgular, dişlerin splintlenmesi ile stresin daha dengeli dağıtıldığını ortaya koymaktadır (Ye, 2022).

Klinik açıdan bu durum, sabitleme tedavisinin yalnızca estetik veya konfor amaçlı değil, aynı zamanda biyomekanik açıdan dokular üzerindeki aşırı yüklenmeyi azaltıcı bir rol oynadığını göstermektedir (Agrawal vd., 2021; Sioustis vd., 2021). Bununla birlikte, sabitleme zamanlaması da kritik olup erken dönemde yapılan splintleme ilerleyen rezorpsiyonun önüne geçebilir (Ye vd., 2022).

Ayrıca periodontitisli dişlerde intrüzyon gibi ortodontik hareketler sırasında kuvvetlerin ne ölçüde azaltılması gerektiği de FEA ile sayısal olarak ortaya konmuştur. Örneğin, her 1 mm kemik kaybı için intrüzyon kuvvetinin yaklaşık %8–9 oranında azaltılması gerektiği rapor edilmiştir (Ugarte & Cattaneo, 2021). Bu bulgular, klinikte bireyselleştirilmiş kuvvet dozajı yaklaşımına bilimsel zemin kazandırmaktadır.

FEA'nın bir diğer önemli katkısı, kemik grefti, membran, bariyer materyalleri gibi periodontal cerrahi materyallerin biyomekanik etkilerini değerlendirmesidir. Graft veya membran uygulamalarıyla yeniden kazanılan destek dokunun, yük dağılımı üzerindeki etkilerini simüle

eden modeller, farklı materyallerin biyomekanik davranışını ortaya koymaktadır (Nainggolan & Priaminiarti, 2025; Wang vd., 2024).

Özellikle yeni jenerasyon biyomateryallerin kemik ile entegrasyon süreçlerinde, arayüz bölgesindeki stres dağılımının kemik iyileşmesi için kritik olduğu gösterilmiştir (Nainggolan & Priaminiarti, 2025). Ayrıca görüntüleme yöntemleriyle elde edilen hasta-özel geometrilerin FEA modellerine entegrasyonu, materyal seçiminde kişiselleştirilmiş öngörüler sunmaktadır.

Klinik açıdan, bu tür modeller hangi tip greft veya membranın belirli bir defekti daha stabil hale getirebileceğini öngörmeye yardımcı olurken, mühendislik açısından biyomateryallerin mekanik özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkisini sayısallaştırmaktadır (Nainggolan & Priaminiarti, 2025).

4. Hasta-Spesifik Modeller ve Yeni Yaklaşımlar

4.1. CBCT/MRI Tabanlı 3D Modelleme

Güncel FEA genellikle tek bir bireye ait anatomik veriler üzerinden yürütülmektedir. Ancak CBCT taramalarından hasta-spesifik ve yüksek doğruluklu modellerin oluşturulması, segmentasyon, geometri rekonstrüksiyonu ve yeniden ağ oluşturma gibi yoğun emek gerektiren aşamalar nedeniyle karmaşık bir süreçtir (Gholamalizadeh vd., 2022). Diş hekimliğinde CBCT, gömülü üçüncü molarların anatomik ilişkilerinin belirlenmesinde %86,2 (Orhan vd., 2021), kanal, sinüs ve diş eksikliği bölgelerinin tespitinde %95,3 (Kurt vd., 2021), periapikal lezyon teşhisinde %92,8 (Orhan vd., 2020) ve Sjögren sendromunun tanısında %96 başarı sağlamıştır (Hiraiwa vd., 2019). Bununla birlikte, CBCT’de YZ tabanlı tanıya yönelik çalışmalar henüz sınırlıdır.

MRI ise iyonlaştırıcı radyasyon içermemesi ve yüksek kontrast çözünürlüğü sayesinde maksillofasiyal radyolojide önemli bir tanı yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yumuşak dokuların değerlendirilmesinde Spin Echo (SE), Gradient Echo (GRE) ve STIR gibi diziler ile; DWI ve kontrastlı MRI gibi ileri teknikler, doku perfüzyonu ve benign-malign ayırımında değerli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca temporomandibular eklem, nörovasküler yapılar ve sert dokulara ilişkin tanısal katkıları da artmaktadır. Son yıllarda MRI verilerinin yüksek çözünürlüklü anatomik görüntüler sağlaması, bu verilerin FEA modellerinin geometrik doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmasına da olanak tanımaktadır. Özellikle temporomandibular eklem diskine ilişkin FEA çalışmalarında, MRI’den elde edilen hasta-spesifik doku konturları modelleme sürecine entegre edilerek biyomekanik analizlerin doğruluğu artırılmıştır (Lai, 2020). Sonuç olarak, MRI’nın diş hekimliğinde giderek artan kullanımı yalnızca tanısal süreçlerde değil, aynı zamanda FEA tabanlı biyomekanik modellemeler için anatomik referans verisi sağlaması açısından da önemli bir potansiyel taşımaktadır (Öçbe vd., 2025).

4.2. Yapay Zekâ ile FEA Sonuçlarının Öngörülmesi

FEA, implantların biyomekanik davranışlarını ve kemikle etkileşimlerini anlamada kritik bir yöntemdir. Stres dağılımı ve yük aktarımını değerlendirme olanağı, implant geometrisinin optimizasyonu ve hasta-spesifik tasarımların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Valente vd., 2023). Trabeküler yapı ve kemik yeniden şekillenmesini içeren çok ölçekli modellemelere duyulan ihtiyaç, yöntemin öngörü gücünü artırma açısından önem taşımaktadır (Falcinelli vd., 2023; Valente vd., 2021).

Güncel araştırmalar, FEA’nın yapay zekâ ile entegrasyonunun parametre optimizasyonu, çok ölçekli modelleme ve büyük veri analizinde yeni imkânlar sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, in vivo doğrulamalar yöntemin güvenilirliğini artıracak, klinik ve mühendislik disiplinleri arasındaki iş birliği ise implantların uzun dönem başarısını güçlendirecektir. Makine

ğrenimi algoritmaları ve bulut tabanlı simülasyonlar sayesinde FEA'nın klinik uygulamalara entegrasyonu kolaylaşmakta ve yenilikçi çözümler için önemli bir potansiyel ortaya çıkmaktadır (Valente vd., 2023)

4.3. Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) ile Optimizasyon

Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM), oklu değişkenlerin süreç ve ürün performansı üzerindeki etkilerini analiz ederek optimizasyon sağlayan istatistiksel bir tekniktir (Myers vd., 2016). Geleneksel yöntemler çok sayıda model ve parametre kombinasyonu gerektirdiğinden sınırlı kalırken, Deney Tasarımı ile birlikte uygulanan RSM daha etkin bir optimizasyon sunmaktadır (Freitas vd., 2021).

Diş hekimliğinde, özellikle implant geometrisinin osseointegrasyon başarısı üzerindeki etkilerini değerlendirmede RSM öne çıkmaktadır. Bu yöntem, ideal implant açısının belirlenmesine olanak tanırken (Murat vd., 2025), All-on-4 protezlerde distal implant açılarının biyomekanik etkilerini de daha yüksek doğrulukla analiz etmeyi mümkün kılmaktadır (Bukhari vd., 2024; Freitas vd., 2021). FEA ile RSM entegrasyonunun kullanıldığı çalışmalarda, implant açısı ve oklüzal yk yönünün peri-implant stres dağılımına etkileri sistematik olarak ortaya konmuştur (Murat vd., 2025).

4.4. Dijital İkiz (Digital Twin) Kavramı

Hesaplamalı mekanik, biyomedikal mühendislik ve dijital sağlının kesişiminde yer alan Dijital İkiz Teknolojisi (DTT), diş hekimliğinde tanı, tedavi planlaması ve biyomekanik değerlendirmelerde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Gerçek zamanlı hasta verileri, görüntüleme ıktıları ve sonlu eleman modelleriyle desteklenen DTT; ortodontide hareket dizilerinin ve aparey parametrelerinin simülasyonu (Liv vd., 2024), implant biyomekaniğinde yüzey kaplamaları ve kemik yeniden şekillenme süreçlerinin değerlendirilmesi (Alshadidi vd., 2024) ve ağız cerrahisinde minimal invaziv ekstraksiyon planlamaları (Xing vd., 2024) gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

DTT, tanı doğruluğunu artırma, invaziv prosedürleri azaltma ve klinik iş akışlarını değiştirme potansiyeline sahiptir (Roy vd., 2025). Bununla birlikte, izotropik materyal varsayımları ve statik sınır koşulları gibi sınırlamalar devam etmektedir. Gelecekte, hasta-spesifik biyolojik yanıtların entegrasyonu ve standart protokollerin değiştirilmesi, dijital ikizlerin klinik güvenilirliğini artırarak kişiselleştirilmiş tedavi planlarını mümkün kılacaktır.

5. Klinik Uygunluk ve Doğrulama

5.1 FEA Sonuçları ile Klinik Gözlemler Arasındaki Uyumsuzluk Nedenleri

Biyomekanik simülasyonlardaki hatalar, modelleme ve ayırıklaştırma süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Modelleme hataları matematiksel varsayımlardan, ayırıklaştırma hataları ise özellikle tıbbi görüntülerden türetilen ağ yapılarından doğmakta ve hasta-spesifik FEA modellerinin güvenilirliğini sınırlamaktadır (Duprez vd., 2020). Bu nedenle, doğru sonlu eleman yöntemlerinin in vivo deneylerle doğrulanması, çalışmaların güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Chang vd., 2018). Dental implantlarda primer stabilitenin belirlenmesinde FEA yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak, modelleme varsayımları sonuçlar üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir. Vautrin vd. (2025) tarafından yürütülen bir çalışmada, kemik dokusunun homojen kabul edilmesi yük taşıma kapasitesinin olduğundan düşük, arayüzün bağlı tanımlanması ise olduğundan yüksek tahmin edilmesine yol açmıştır. İmplantın rijit veya elastik tanımlanması başlangıç sertliğini etkilese de, nihai yük kapasitesinde anlamlı fark oluşturmamıştır. Bu bulgular, yanlış varsayımların klinik karar süreçlerinde önyargılı sonuçlara neden olabileceğini göstermektedir. FEA genellikle in vitro verilere

dayansa da, bireysel biyolojik farklılıklar, iyileşme süreçleri ve çevresel faktörler klinik ortamda farklılık yaratabilmektedir. Ayrıca deneysel test koşulları ve modelleme tekniklerindeki materyal farklılıkları da FEA sonuçlarının klinik bulgularla tam uyum göstermemesine yol açabilmektedir; nitekim Maravić vd. (2022) tarafından yapılan in vitro çalışma bu farklılıkların sonuçları etkileyebileceğini ortaya koymuştur.

5.2. Deneysel Doğrulama Yöntemleri (Strain Gauge, Fotoelastisite)

Strain gauge'ler, deformasyona bağlı gerilimi elektriksel direnç değişimi üzerinden ölçen hassas cihazlardır ve dental implant biyomekaniğinde hem statik hem de dinamik yüklerin değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Genellikle uniaxial ve rozet tipli konfigürasyonlarla implant yüzeyine, abutmentlere veya protez bağlantı elemanlarına yerleştirilir; momentlerin doğrudan ölçümü mümkün olmasa da kemik yüzeyindeki gerilmeler dolaylı göstergeler olarak değerlendirilebilmektedir (Glantz vd., 1993; Assif vd., 1996; Sahin vd., 2002; Rodriguez vd., 1993). Fotoelastik stres analizi ise, karmaşık geometrilere kritik gerilme bölgelerini ve konsantrasyonlarını görselleştirmeye imkân tanıyan deneysel bir yöntemdir. Dental alanda ilk kez Zak tarafından ortodontik uygulamalarda kullanılmış, sonrasında implant ve protez biyomekaniğinde yaygınlaşmıştır (Zak, 1935). Kemik heterojen yapısını tam olarak yansıtmada sınırlı olsa da, protez ve implant etkileşimlerinin değerlendirilmesinde değerli bilgiler sunmaktadır (Frocht, 1962; Zak, 1935; Yu vd., 2001; Sadowsky & Caputo, 2000). Güncel çalışmalar, her iki yöntemin de implant biyomekaniğinde tamamlayıcı roller üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bu teknikler; farklı bağlantı sistemlerinin, greftlenmiş ve greftlenmemiş implantların, bağlantı tiplerinin ve abutment tasarımlarının biyomekanik performansını analiz etmede kullanılmış, ayrıca doğal diş ve implant destekli protezler arasındaki yük aktarımı farklılıklarını incelemiştir (Cehreli vd., 2006; Maeda vd., 2006; Heckmann vd., 2006; Suedam vd., 2009). Fotoelastisite ve strain gauge analizleri, osseointegre implantların mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde birbirini tamamlayan, güvenilir deneysel mühendislik yöntemleri olarak öne çıkmaktadır.

FEA bulgularının klinik geçerliliği literatürde yapılan in-vitro ve in-vivo çalışmalarla büyük ölçüde desteklenmektedir. Fotoelastik analiz, strain gauge ölçümleri, mikro-BT tabanlı mekanik testler ve klinik sonuç raporları ile karşılaştırıldığında, FEA'nın stres dağılımı, deformasyon paternleri ve yük transfer özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin ettiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, klinik koşulların birebir modellenememesi nedeniyle sonuçlar her zaman deneysel veriler ışığında yorumlanmalıdır. Bu karşılaştırmalar, FEA'nın hem mühendislik hem de klinik karar süreçlerinde güvenilir bir analiz aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Deneysel doğrulama yöntemlerinin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Örneğin, fotoelastik analiz yalnızca yüzeyde oluşan gerilme desenlerini gösterebilmekte, iç dokulardaki üç boyutlu stres dağılımını doğrudan yansıtamamaktadır. Strain gauge ölçümleri ise belirli noktalardan veri toplayabildiği için tüm yapı üzerindeki stres davranışını temsil etmez. Ayrıca mekanik test cihazlarında uygulanan yükler çoğu zaman klinik çiğneme dinamiklerini tam olarak modelleyemez. Bu nedenle deneysel veriler, FEA bulgularının doğrulanmasında değerli olmakla birlikte, sonuçlar her zaman bu yöntemlerin fiziksel kısıtları içinde değerlendirilmelidir.

5.3. Klinik Karar Desteği İçin Nasıl Daha Güvenilir Hale Getirilebilir?

Hasta-spesifik FEA modelleri, CBCT veya MRI verilerinden elde edilen 3D anatomik yapılar üzerine inşa edilmeli ve kemik yoğunluğu, trabeküler/kortikal ayrımı ile periodontal ligament özellikleri gibi doku heterojenliği dikkate alınmalıdır. Böylece bireysel anatomik farklılıkları yansıtan modeller, genelleştirilmiş modellere kıyasla daha güvenilir stres ve risk analizi sağlar (Paracchini vd., 2020; Herráez vd., 2020). FEA sonuçlarının güvenilirliği, strain-gauge,

fotoelastik ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemleriyle in vitro doğrulanmasıyla artırılabilir (Herrez vd., 2020; Kshirsagar & Dhatrak, 2023).

Ayrıca klinik yükler bireye özgü ve dinamik çok yönlü çiğneme kuvvetlerini yansıtacak şekilde modellenmelidir. Yükleme senaryoları ve sınır koşullarının klinik gerçekliği temsil etmesi, implant biyomekaniğinde daha doğru öngörüler sunar (Lai vd., 2020). Bununla birlikte, malzeme lineerliği, homojenlik varsayımları ve basitleştirmeler gibi sınırlılıklar açıkça belirtilmeli, aksi halde klinik kararlar aşırı güvenle verilmemelidir (Merema vd., 2021).

Dijital ikiz yaklaşımı, hasta-spesifik FEA modellerinin klinik süreç boyunca güncellenmesini mümkün kılmakta; yapay zekâ destekli analizler ise geçmiş klinik verilerle entegrasyon sağlayarak daha öngörücü ve güvenilir karar destek sistemleri oluşturmaktadır (Ahn vd., 2024).

6. Sınırlılıklar

FEA, diş hekimliğinde biyomekanik süreçleri anlamak için güçlü bir araç olsa da bazı önemli sınırlılıklara sahiptir. Çoğu modelde biyolojik dokular homojen ve izotrop kabul edilmektedir (Natali vd., 2004). Oysa ki PDL non-lineer, viskoelastik özellikler gösterirken; kortikal ve trabeküler kemik farklı yoğunluklarda ve anisotropik davranışlar sergilemektedir. Bu varsayımlar, modelin klinik gerçekliği tam olarak yansıtmasını engeller. Benzer şekilde, çiğneme kuvvetleri günlük hayatta dinamik, değişken ve bireye özgüdür. FEA’da ise genellikle statik ve idealize edilmiş yükleme senaryoları kullanılmaktadır. Bu da özellikle bruksizm, parafonksiyon veya travmatik oklüzyon gibi bireysel farklılıkların modele aktarılamaması sonucunu doğurur. Ayrıca hastadan hastaya değişen kemik yoğunluğu, yaş, cinsiyet ve metabolik durumlar biyomekanik yanıt üzerinde belirleyici olsa da mevcut modeller genellikle ortalama değerlerle sınırlı kalır. Bu durum, FEA’nın klinik ngrleri destekleyen fakat mutlak doğruluk sağlamayan bir yöntem olduğunu göstermektedir.

7. Gelecek Perspektifleri

Bu sınırlılıkların aşılabilmesi için gelecekte multidisipliner çalışmaların ön plana çıkması kaçınılmazdır. Mühendislik altyapısı ile klinik bilgilerin bütünleştirilmesi, hasta-spesifik modellemelerin daha gerçekçi hale gelmesine katkı sağlayacaktır. Özellikle CBCT ve intraoral tarama verilerinin entegre edilmesi, bireye özgü 3 boyutlu modellerin rutin klinik kullanıma girmesini mümkün kılabilir. Böylece hasta için en uygun implant boyu, açısı veya periodontal splintleme yöntemi önceden öngörülebilir hale gelecektir. Ayrıca yapay zekâ ve makine öğrenmesi destekli analizlerin FEA ile birleştirilmesi, klinisyene daha kısa sürede güvenilir sonuçlar sunma potansiyeline sahiptir. Periodontoloji ve implantoloji özelinde ise PDL’nin non-lineer mekanik özelliklerini, progresif kemik kaybı senaryolarını ve implant-protez etkileşimlerini daha gerçekçi biçimde modelleyebilecek yeni yazılım ve algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Böylelikle yalnızca mekanik yük dağılımı değil, aynı zamanda biyolojik adaptasyon süreçleri de simülasyonlara entegre edilebilir.

Sonuç

FEA, diş hekimliğinde mühendislik ile klinik arasında köprü kurarak biyomekanik süreçlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayan güçlü bir yöntemdir. Klinik olarak bütüncül bakış açısıyla, kemik kaybı durumlarının implant stabilitesi üzerindeki etkileri, PDL’nin kompleks yapısının mekanik modellerde temsil edilmesi, dişlerin splintlenmesinin biyomekanik sonuçları ve implant-protez ilişkilerinin daha objektif incelenmesi, FEA’nın klinik açıdan zgn katkıları arasında yer almaktadır. Ancak yöntemin sınırlılıkları göz önüne alındığında, elde edilen bulguların doğrudan klinik kararların yerine geçemeyeceği, fakat bu kararları destekleyen tamamlayıcı bir araç olduğu unutulmamalıdır. Daha güvenilir ve hasta odaklı sonuçların elde edilebilmesi için mühendislik ve klinik bilimlerin işbirliği içinde yürütüleceği multidisipliner araştırmalar kritik öneme sahiptir.

Çıkar Beyanı: Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur. (Birden fazla yazar varsa doldurulacaktır)

Etik Beyanı: Bu çalışmanın tüm hazırlanma süreçlerinde etik kurallara uyulduğunu yazarlar beyan eder. Aksi bir durumun tespiti hâlinde Avrasya Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi'nin hiçbir sorumluluğu olmayıp, tüm sorumluluk çalışmanın yazarlarına aittir.

Yazar Katkısı: Yazarların katkısı aşağıdaki gibidir; (Birden fazla yazar varsa doldurulacaktır)

Giriş: 3. yazar

Literatür: 1 ve 2. yazar

Metodoloji: 1 ve 2 yazar

Sonuç: 3. yazar

1. yazarın katkı oranı: %40 . 2. yazarın katkı oranı: %30. 3. yazarın katkı oranı %30.

Conflict of Interest: The authors declare that they have no competing interests. (To be filled if there is more than one author)

Ethical Approval: The authors declare that ethical rules are followed in all preparation processes of this study. In the case of a contrary situation, Avrasya University Science and Engineering Journal has no responsibility, and all responsibility belongs to the study's authors.

Author Contributions: author contributions are below; (To be filled if there is more than one author)

Introduction: 3. Author

Literature: 1 and 2. Author

Methodology: 1. And 2. Author

Conclusion: 3. Author

1st author's contribution rate: %40, 2nd author's contribution rate: %30, 3th author's contribution rate: %30.

Referanslar

- Ahn, S., Kim, J., Baek, S., Kim, C., Jang, H., & Lee, S. (2024). Toward digital twin development for implant placement planning using a parametric reduced-order model. *Bioengineering*, 11(1), 84.
- Abdelhafeez, M. M. (2024). Applications of finite element analysis in endodontics: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 16(Suppl 3), S1977–S1980.
- Abouzeid, H. L., et al. (2023). Assessment of periodontal health among removable and fixed partial denture wearers. *Medical Science Monitor*, 29, e939172.
- Abraham, R., et al. (2014). Comparison of stress around endosseous implants in different configurations using finite element analysis. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 43(3), 325–330.
- Agrawal, R., Narang, S., Ahmed, H., et al. (2021). Influence of occlusal bite forces on teeth with altered periodontal support: A three-dimensional finite element stress analysis. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 13(Suppl 1), S688–S691.
- Akça, K., Fanuscu, M. I., & Caputo, A. A. (2008). Effect of compromised cortical bone on implant load distribution. *Journal of Prosthodontics*, 17, 616–620.
- Alemayehu, D. B., Todoh, M., & Huang, S. (2024). Nonlinear finite element analysis of bone–implant contact in three short dental implant models with varying osseointegration percentages. *Oral*, 4(4), 505–524.
- Alp, S., Gulec Alagoz, L., & Ulusoy, N. (2020). Effect of direct and indirect materials on stress distribution in Class II MOD restorations: A 3D finite element analysis study. *BioMed Research International*, 2020, 7435054.
- Alshadidi, A. A. F., Dommeti, V. K., Aldosari, L. I. N., Hassan, S. A. B., Okshah, A., Merdji, A., & Roy, S. (2024). Influence of surface texturing and coatings on mechanical properties and integration with bone tissue: An *in silico* study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1439262.
- Al-Sinaidi, A. A., & Preethanath, R. S. (2014). The effect of fixed partial dentures on periodontal status of abutment teeth. *The Saudi Journal for Dental Research*, 5(2), 104–109.
- Ansari, S., Solati-Hashjin, M., Sadeghi, F., & Amirzade-Iranaq, M. H. (2021). Mechanical integrity of All-on-Four dental implant systems: Influence of implant material, framework material, and loading angle. *The Open Dentistry Journal*, 15(1), 1–10.
- Assif, D., Marshak, B., & Horowitz, A. (1996). Analysis of load transfer and stress distribution by an implant-supported fixed partial denture. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 75, 285–291.

- Ausiello, P., Franciosa, P., Martorelli, M., & Watts, D. C. (2011). Numerical fatigue 3D finite element modeling of indirect composite-restored posterior teeth. *Dental Materials*, 27(5), 423–430.
- Avallone, E. A., & Baumeister, T. (1997). *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. McGraw-Hill.
- Bansal, P., Seth, T., Kumar, M., Bhatt, M., Arora, P., Gupta, I., & Singh, S. (2024). Comparative evaluation of stress distribution and deformation in Class II cavities restored with two different biomimetic restorative materials: A three-dimensional finite element analysis. *Cureus*, 16(9).
- Bi, Y., & Guo, J. (2022). Anchorage effects of ligation and direct occlusion in orthodontics: A finite element analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 162(3), 305–312.
- Bukhari, S. M. A., Qurashi, R., Husnain, N., Sadiq, M. A., Zafar, M. Q., Anwar, M. T., et al. (2024). Response surface methodology-based optimization of coating material, coating thickness, and diameter of dental implant for enhanced mechanical behavior using finite element method. *Advanced Engineering Materials*, 26(24), 2401729.
- Cattaneo, P. M., & Cornelis, M. A. (2021). Orthodontic tooth movement studied by finite element analysis: An update. What can we learn from these simulations? *Current Osteoporosis Reports*, 19, 175–181.
- Cehreli, M. C., & Akça, K. (2006). Impression techniques and misfit-induced strains on implant-supported superstructures: An *in vitro* study. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 26, 379–385.
- Cehreli, M. C., & Akça, K. (2004). Narrow-diameter implants as terminal support for occlusal three-unit fixed partial dentures: A biomechanical analysis. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 24, 513–519.
- Cehreli, M. C., Akkocaoglu, M., Comert, A., et al. (2007). Bone strains around apically free versus grafted implants in the posterior maxilla of human cadavers. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 45, 395–402.
- Cehreli, M. C., Akkocaoglu, M., Comert, A., et al. (2005). Human *ex vivo* bone tissue strains around natural teeth versus immediate oral implants. *Clinical Oral Implants Research*, 16, 540–548.
- Cehreli, M. C., Iplikçioglu, H., & Bilir, O. G. (2002). The influence of the location of load transfer on strains around implants supporting four-unit cement-retained fixed prostheses: *In vitro* evaluation of axial versus offset loading. *Journal of Oral Rehabilitation*, 29, 394–400.
- Celik, B., & Uludag, G. (2007). Photoelastic stress analysis of various retention mechanisms on 3-implant-retained mandibular overdentures. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 97, 229–235.
- Chang, Y., Tambe, A. A., Maeda, Y., Wada, M., & Gonda, T. (2018). Finite element analysis of dental implants with validation: To what extent can we expect the model to predict biological phenomena? A literature review and proposal for classification of a validation process. *International Journal of Implant Dentistry*, 4(1), 7.
- Chen, L., & Wang, Y. (2024). Advancements in finite element analysis for prosthodontics. *Progress in Medical Devices*, 2(4), 187–202.
- Chen, P. H., Elamin, E., Sayed Ahmed, A., Givan, D. A., Fu, C. C., & Lawson, N. C. (2024). The effect of restoration thickness on the fracture resistance of 5 mol% yttria-containing zirconia crowns. *Materials*, 17(2), 365.
- Coelho, C., Calamote, C., Pinto, A. C., Esteves, J. L., Ramos, A., Escuin, T., & Souza, J. C. (2021). Comparison of CAD-CAM and traditional chairside processing of four-unit interim prostheses with and without cantilevers: Mechanics, fracture behavior, and finite element analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(3), 543.e1–543.e10.
- Desai Shrikar, R., & Shinde Harshada, H. (2012). *Finite element analysis: Basics and its applications in dentistry*. [Kitap bölümü/kitap bilgisi belirtilmedi].
- Di Francesco, P., Bechir, A., Popescu, A. I., Chivu, M. V., Dobrescu, A. M., Comăneanu, R. M., & Târcolea, M. (2025). Finite element analysis (FEA) of the stress behavior of some dental materials. *Journal of Medicine and Life*, 18(1), 29–37.
- Drummond, L. B., Bezerra, A. P., et al. (2024). Long-term assessment of the periodontal health of removable partial denture wearers: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. Advance online publication.

- Dula, L. J., Shala, K. S., Pustina-Krasniqi, T., et al. (2015). The influence of removable partial dentures on the periodontal health of abutment and non-abutment teeth. *European Journal of Dentistry*, 9(3), 382–386.
- Duprez, M., Bordas, S. P. A., Bucki, M., Bui, H. P., Chouly, F., Lleras, V., & Tomar, S. (2020). Quantifying discretization errors for soft tissue simulation in computer-assisted surgery: A preliminary study. *Applied Mathematical Modelling*, 77, 709–723.
- Eazhil, R., Swaminathan, S. V., Gunaseelan, M., Kannan, G. V., & Alagesan, C. (2016). Impact of implant diameter and length on stress distribution in osseointegrated implants: A 3D finite element analysis. *Journal of the International Society of Preventive & Community Dentistry*, 6(6), 590–596.
- Elshazly, M., & Bourauel, C. (2022). Computer-aided finite element model for biomechanical analysis of orthodontic aligners. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 22(5), 2250041.
- Fakhr, M., & Elmesellawy, M. Y. (2023). Stress analysis in root dentine using the single cone versus the continuous wave obturation technique: A finite element study. *Egyptian Dental Journal*, 69(2), 1595–1602.
- Falcinelli, C., Valente, F., Vasta, M., & Traini, T. (2023). Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dental Materials*, 39(4), 539–556.
- Fidancıoğlu, Y. D., Alkurt Kaplan, S., Mohammadi, R., & Gönder, H. Y. (2025). Three-dimensional finite element analysis (FEM) of tooth stress: The impact of cavity design and restorative materials. *Applied Sciences*, 15(17), 9677.
- Freitas, J. P., Agostinho Hernandez, B., Gonçalves, P. J. P., Baptista, E. C., & Capello Sousa, E. A. (2021). Novel and simplified optimisation pathway using response surface and design of experiments methodologies for dental implants based on the stress of the cortical bone. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 235(11), 1297–1309.
- Frocht, M. M. (1962). *Photoelasticity*. Wiley.
- Galal, M. M., Ismail, A. G., & Omar, N. (2025). Stress analysis of different experimental finite element models of rotary endodontic instruments. *Bulletin of the National Research Centre*, 49, 22.
- Gameiro, G. H., Bocchiardo, R., Dalstra, M., & Cattaneo, P. M. (2021). Individualization of the three-piece base arch mechanics according to various periodontal support levels: A finite element analysis. *[Dergi bilgisi belirtilmemiş]*.
- Gandhi, V., & Singh, J. (2017). Finite element analysis: A biomechanical tool in orthodontics. *International Journal of Orthodontic Rehabilitation*, 8(2), 49–54.
- Gasik, M., Lambert, F., & Bacevic, M. (2021). Biomechanical properties of bone and mucosa for design and application of dental implants. *Materials*, 14(11), 2845. <https://doi.org/10.3390/ma14112845>
- Geng, J. P., Tan, K. B., & Liu, G. R. (2001). Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 85(6), 585–598. <https://doi.org/10.1067/mpr.2001.115251>
- Gholamalizadeh, T., Moshfeghifar, F., Ferguson, Z., Schneider, T., Panozzo, D., Darkner, S., & Erleben, K. (2022). Open-Full-Jaw: An open-access dataset and pipeline for finite element models of human jaw. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 224, 107009. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107009>
- Glantz, P. O., Rangert, B., Svensson, A., & et al. (1993). On clinical loading of osseointegrated implants: A methodological and clinical study. *Clinical Oral Implants Research*, 4, 99–105. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1993.040301.x>
- Güzelce, E. (2023). Biomechanical comparison of different framework materials in mandibular overdenture prosthesis supported with implants of different sizes: A finite element analysis. *BMC Oral Health*, 23(1), 450. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03104-4>
- Heckmann, S. M., Karl, M., Wichmann, M. G., & et al. (2006). Loading of bone surrounding implants through three-unit fixed partial denture fixation: A finite-element analysis based on in vitro and in vivo strain measurements. *Clinical Oral Implants Research*, 17, 345–350. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2005.01221.x>
- Herráez-Galindo, C., Torres-Lagares, D., Martínez-González, Á. J., Pérez-Velasco, A., Torres-Carranza, E., Serrera-Figallo, M. A., & Gutiérrez-Pérez, J. L. (2020). A comparison of photoelastic and finite elements analysis in internal connection and bone level dental implants. *Metals*, 10(5), 648.

<https://doi.org/10.3390/met10050648>

- Hiraiwa, T., Ariji, Y., Fukuda, M., & et al. (2019). A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 48, 20180218. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20180218>
- Hohmann, A., Kober, C., Young, P., & et al. (2011). Influence of different modeling strategies for the periodontal ligament on finite element simulation results. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139(6), 775–783. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.06.040>
- Ibrahim, C. R. M., Sameh, A., & Askar, O. (2024). A finite element analysis study on different angle correction designs for inclined implants in All-on-Four protocol. *BMC Oral Health*, 24(1), 331. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04092-9>
- Ichikawa, H., Yoda, N., Ogawa, T., & et al. (2023). Impact of implant location on load distribution of implant-assisted removable partial dentures: A review of in vitro model and finite-element analysis studies. *International Journal of Implant Dentistry*, 9, 31. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00462-9>
- Jurado, C. A., Pinedo, F., Trevino, D. A. C., Williams, Q., Marquez-Conde, A., Irie, M., & Tsujimoto, A. (2022). CAD/CAM lithium disilicate ceramic crowns: Effect of occlusal thickness on fracture resistance and fractographic analysis. *Dental Materials Journal*, 41(5), 705–709. <https://doi.org/10.4012/dmj.2021-343>
- Kshirsagar, M., & Dhattrak, P. (2023). Strain based in vitro analysis of dental implant using artificial bone model and validation by numerical technique. *Medical Engineering & Physics*, 111, 103931. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.103931>
- Kuc, A. E., Sybilski, K., Stankiewicz, M., Kotuła, J., Kuc, N., Hajduk, G., Małachowski, J., & Sarul, M. (2025). The influence of bone density on stresses in the periodontal ligament during orthodontic movement—Finite element study on innovative model. *Materials*, 18(4), 776. <https://doi.org/10.3390/ma18040776>
- Kurt Bayrakdar, S., Orhan, K., Bayrakdar, I. S., & et al. (2021). A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Medical Imaging*, 21, 86. <https://doi.org/10.1186/s12880-021-00613-9>
- Lahoud, P., Faghihian, H., Richert, R., Jacobs, R., & EzEldeen, M. (2024). Finite element models: A road to in-silico modeling in the age of personalized dentistry. *Journal of Dentistry*, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105348>
- Lai, L., Huang, C., Zhou, F., Xia, F., & Xiong, G. (2020). Finite element analysis of the temporomandibular joint disc in patients with intra-articular disorders. *BMC Oral Health*, 20(1), 93. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01061-7>
- Lee, H., Jo, M., & Noh, G. (2021). Biomechanical effects of dental implant diameter, connection type, and bone density on microgap formation and fatigue failure: A finite element analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 200, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105863>
- Lee, H., Jo, M., Sailer, I., & et al. (2022). Effects of implant diameter, implant–abutment connection type, and bone density on the biomechanical stability of implant components and bone: A finite element analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(4), 716–728. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.016>
- Lepi, S. (1998). *Practical guide to finite elements: A solid mechanics approach* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003064640>
- Li, N., Wang, C., Yang, M., Chen, D., Tang, M., Li, D., & Feng, Y. (2024). Effects of different tooth movement patterns and aligner thicknesses on maxillary arch expansion with clear aligners: A three-dimensional finite element study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1424319. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1424319>
- Maeda, Y., Horisaka, M., & Yagi, K. (2008). Biomechanical rationale for a single implant-retained mandibular overdenture: An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*, 19, 271–275. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2007.01454.x>
- Maeda, Y., Satoh, T., & Sogo, M. (2006). In vitro differences of stress concentrations for internal and external hex implant–abutment connections: A short communication. *Journal of Oral Rehabilitation*, 33, 75–78. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2005.01541.x>
- Maravić, T., Comba, A., Mazzitelli, C., Bartoletti, L., Balla, I., Di Pietro, E., & Mazzoni, A. (2022). Finite element and in vitro study on biomechanical behavior of endodontically treated premolars restored with direct or indirect composite restorations. *Scientific Reports*, 12(1), 12671. <https://doi.org/10.1038/s41598-022->

16931-1

- Markarian, R. A., Ueda, C., Sendyk, C. L., & et al. (2007). Stress distribution after installation of fixed frameworks with marginal gaps over angled and parallel implants: A photoelastic analysis. *Journal of Prosthodontics*, 16, 117–122. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2006.00145.x>
- Merema, B. B. J., Kraeima, J., Glas, H. H., Spijkervet, F. K. L., & Witjes, M. J. H. (2021). Patient-specific finite element models of the human mandible: Lack of consensus on current set-ups. *Oral Diseases*, 27(1), 42–51. <https://doi.org/10.1111/odi.13479>
- Mericske-Stern, R., Assal, P., & Buerger, W. (1996). Simultaneous force measurements in three dimensions on oral endosseous implants in vitro and in vivo: A methodological study. *Clinical Oral Implants Research*, 7, 378–386. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1996.070411.x>
- Minch, L. E., Sarul, M., Nowak, R., Kawala, B., & Antoszewska-Smith, J. (2017). Orthodontic intrusion of periodontally compromised maxillary incisors: A three-dimensional finite element method analysis. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 26(5), 829–833. <https://doi.org/10.17219/acem/64036>
- Moga, R. A., Delean, A. G., Buru, S. M., & et al. (2023). Orthodontic internal resorption assessment in periodontal breakdown—A finite elements analysis (Part II). *Healthcare*, 11(19), 2622. <https://doi.org/10.3390/healthcare11192622>
- Moga, R.-A., Olteanu, C. D., & Delean, A. G. (2024). The importance of boundary conditions and failure criterion in finite element analysis accuracy—A comparative assessment of periodontal ligament biomechanical behavior. *Applied Sciences*, 14(8), 3370. <https://doi.org/10.3390/app14083370>
- Mohanty, S., Das, A. C., Mallick, R. R., Choudhury, P., Sarangi, P., Sahoo, N. R., & Minz, S. A. (2024). Finite element analysis of stress allocation for designing different root canal tapers. *Bioinformation*, 20(9), 1175–1178. <https://doi.org/10.6026/973206300201175>
- Montero, J., Macedo, A. P., Marin, M., & et al. (2022). Fatigue loading effect in custom-made All-on-4 implants system: A finite element analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 134, 105391. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105391>
- Murat, F., Sevinç Gül, S. N., & Şensoy, A. T. (2025). Predictive mathematical modeling of biomechanical behavior in all-on-4 implants design: Effects of distal implant and occlusal load angulation using RSM based on FEA. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1644776. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1644776>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Ochiai, K. T., Williams, B. H., Hojo, S., & et al. (2004). Photoelastic analysis of the effect of palatal support on various implant-supported overdenture designs. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 91, 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2004.03.015>
- Naguib, G. H. H., Hashem, A. B. H., Natto, Z. S., & et al. (2023). The effect of implant length and diameter on stress distribution of tooth-implant and implant-supported fixed prostheses: An in vitro finite element analysis study. *Journal of Oral Implantology*, 49(1), 46–54. <https://doi.org/10.1563/aaid-joi-D-22-00039>
- Nainggolan, D., & Priaminiarti, M. (2025). The role of radiographic imaging and finite element analysis in evaluating occlusal loads and stress distribution in the periodontal ligament. *Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia*, 8(3), 133–140.
- Natali, A. N., Pavan, P. G., & Scarpa, C. (2004). Numerical analysis of tooth mobility: Formulation of a non-linear constitutive law for the periodontal ligament. *Dental Materials*, 20(7), 623–629. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.08.003>
- Ochoa-Escate, D., Valdez-Jurado, F., Watanabe, R., & et al. (2025). Stress distribution in a mandibular Kennedy Class I with bilateral implant-assisted removable partial denture: A finite element analysis. *Oral*, 5(2), 31. <https://doi.org/10.3390/oral5020031>
- Oishi, M., & Nozaki, K. (2015). Finite element analysis of stress distribution in the periodontium. *Journal of Prosthodontic Research*, 59(3), 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2015.02.003>
- Orhan, K., Bayrakdar, I. S., Ezhov, M., & et al. (2020). Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *International Endodontic Journal*, 53, 680–689. <https://doi.org/10.1111/iej.13265>

- Ormianer, Z., Brosh, T., Laufer, B. Z., & et al. (2005). Strains recorded in a combined tooth–implant restoration: An in vivo study. *Implant Dentistry*, 14, 58–62. <https://doi.org/10.1097/01.id.0000151797.53109.5d>
- Ouldyerou, A., Mehboob, H., Mehboob, A., Merdji, A., Aminallah, L., Mukdadi, O. M., & others. (2023). Biomechanical performance of resin composite on dental tissue restoration: A finite element analysis. *PLOS ONE*, 18(12), e0295582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295582>
- Öçbe, M. (2025). The evolving role of MRI in dentomaxillofacial diagnostics: A comprehensive review. *European Oral Research*, 59(1), 58–67. <https://doi.org/10.26650/eor.2025.002>
- Pable, G., Saha, S. G., Saha, M. K., Agarwal, R. S., Meena, S. S., & Poddar, G. (2025). Comparative evaluation of stress distribution in maxillary premolar restored with onlay fabricated with different restorative materials: A three-dimensional finite element analysis study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 28(8), 783–789.
- Pandey, A., Durrani, F., Rai, S. K., Singh, N. K., Singh, P., Verma, R., & Kumar, J. (2023). Comparison between All-on-Four and All-on-Six treatment concepts on stress distribution for full-mouth rehabilitation using three-dimensional finite element analysis: A biomechanical study. *Journal of the Indian Society of Periodontology*, 27(2), 180–188.
- Paracchini, L., Barbieri, C., Redaelli, M., Di Croce, D., Vincenzi, C., & Guarnieri, R. (2020). Finite element analysis of a new dental implant design optimized for desirable stress distribution in the surrounding bone region. *Prosthesis*, 2(3), 225–236. <https://doi.org/10.3390/prosthesis2030018>
- Park, J. G., Lim, B. S., & Lee, I. B. (2008). Cuspal deflection in Class V cavities restored with composite resins. *Journal of the Korean Academy of Conservative Dentistry*, 33(2), 83–89.
- Pereira, G. K. R., Graunke, P., Maroli, A., Zucuni, C. P., Prochnow, C., Valandro, L. F., Caldas, R. A., & Bacchi, A. (2019). Lithium disilicate glass-ceramic versus translucent zirconia polycrystals bonded to distinct substrates: Fatigue failure load, number of cycles for failure, survival rates, and stress distribution. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 91, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.11.029>
- Poovarodom, P., Rungsiyakull, C., Suriyawanakul, J., & et al. (2024). Multi-objective optimization of custom implant abutment design for enhanced bone remodeling in single-crown implants using three-dimensional finite element analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 15867. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66469-6>
- Porter, J. A., Jr., Petropoulos, V. C., & Brunski, J. B. (2009). Comparison of load distribution for implant overdenture attachments. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 24(5), 651–662.
- Rajaeirad, M., Fakharifar, A., Posti, M. H. Z., & et al. (2024). Evaluating the effect of functionally graded materials on bone remodeling around dental implants. *Dental Materials*, 40(5), 858–868. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.009>
- Rajgopal, R. (2018). Finite element analysis in orthodontics: Applications and limitations. *Journal of Clinical Orthodontics*, 52(9), 513–521.
- Rastegari, M., & Hosseini, A. (2020). An overview of basic concepts of finite element analysis in orthodontics. *Dental Research Journal*, 17(4), 243–251. <https://doi.org/10.4103/1735-3327.290403>
- Reddy, J. K., Malini, D. L., Ballullaya, S. V., Pushpa, S., Devalla, S., & Reddy, A. V. (2021). Influence of “MOTRCS” factors on the performance of various direct and indirect restorations: A finite element analysis. *Journal of Conservative Dentistry*, 24(1), 15–23. https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_412_20
- Rodriguez, A. M., Aquilino, S. A., Lund, O. S., & et al. (1993). Evaluation of strain at the terminal abutment site of a fixed mandibular implant prosthesis during cantilever loading. *Journal of Prosthodontics*, 2, 93–102.
- Rodriguez-Ciurana, X., Vela-Nebot, X., Rodado-Alonso, C., & Segalà-Torres, M. (2009). Biomechanical repercussions of bone resorption related to the implant–abutment gap: A finite element analysis of three implant designs. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 24(4), 616–621.
- Roscoe, M. G., Cattaneo, P. M., Dalstra, M., Ugarte, O. M., & Meira, J. B. C. (2021). Orthodontically induced root resorption: A critical analysis of finite element studies’ input and output. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 159(6), 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.05.021>
- Roy, S., Richert, R., Tavares, J. M. R. S., & Lahoud, P. (2025). Editorial: Applications of digital twin technology in dentistry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1624734. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1624734>

- Ryu, Y.-H., Ju, B.-S., Jung, W.-Y., & Limkatanyu, S. (2013). Numerical evaluation of fundamental finite element models in bar and beam structures. *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 1–8.
- Sadowsky, S. J., & Caputo, A. A. (2000). Effect of anchorage systems and extension base contact on load transfer with mandibular implant-retained overdentures. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 84, 327–334.
- Şahin, S., Cehreli, M. C., & Yalçın, E. (2002). The influence of functional forces on the biomechanics of implant-supported prostheses: A review. *Journal of Dentistry*, 30, 271–282.
- Schmid, A., Strasser, T., & Rosentritt, M. (2023). Finite element analysis of occlusal interferences in dental prosthetics caused by occlusal adjustment. *The International Journal of Prosthodontics*, 36(4).
- Sevinç Gül, S. N., Murat, F., & Şensoy, A. T. (2025). Evaluation of biomechanical effects of mandible arch types in All-on-4 and All-on-5 dental implant design: A three-dimensional finite element analysis. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(4), 134.
- Singh, J., & Kambalyal, P. (2016). Revolution in orthodontics: Finite element analysis. *Journal of Indian Orthodontic Society*, 50(2), 88–95.
- Sioustis, A., Axinte, A., & et al. (2021). Finite element analysis of mandibular anterior teeth with healthy but reduced periodontium. *Applied Sciences*, 11(9), 3824. <https://doi.org/10.3390/app11093824>
- Srinivasan, M., & Padmanabhan, T. V. (2008). Intrusion in implant-tooth-supported fixed prosthesis: An in vitro photoelastic stress analysis. *Indian Journal of Dental Research*, 19, 6–11.
- Standlee, J. P., & Caputo, A. A. (1992). The retentive and stress-distributing properties of split threaded endodontic dowels. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 68, 436–442.
- Su, C., & Chang, H. (2010). Modeling viscoelastic behavior of periodontal ligament: A finite element study. *Journal of Dental Sciences*, 8(2), 121–128.
- Suedam, V., Souza, E. A., Moura, M. S., & et al. (2009). Effect of abutment height and framework alloy on load distribution of mandibular cantilevered implant-supported prosthesis. *Clinical Oral Implants Research*, 20, 196–200.
- Sun, X., Cheng, K. J., Liu, Y. F., & et al. (2023). Biomechanical comparison of All-on-4 and All-on-5 implant-supported prostheses with alteration of anterior–posterior spread: A three-dimensional finite element analysis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1187504. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1187504>
- Takeshita, S., Sasaki, A., Tanne, K., Publico, A. S., & Moss, M. L. (2001). The nature of human craniofacial growth studied with a finite element analytical approach. *Clinical Orthodontic Research*, 4, 148–160.
- Tanne, K., Sakuda, M., & Burstone, C. J. (1987). Three-dimensional finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 92(6), 499–505.
- Tavangar, S. M., Davalloo, R. T., Darabi, F., & Tajziehchi, G. (2025). Stress distribution pattern in Class I cavities restored by different techniques according to the stress-reducing direct composite concept: A finite element analysis. *International Journal of Dentistry*, 2025(1), 7196931.
- Tokuhisa, M., Matsushita, Y., & Koyano, K. (2003). In vitro study of a mandibular implant overdenture retained with ball, magnet, or bar attachments: Comparison of load transfer and denture stability. *The International Journal of Prosthodontics*, 16, 128–134.
- Tomm, A. G. F., Machado, P. S., Rosa, L. S. D., Pereira, G. K. R., Spazzin, A. O., & Alessandretti, R. (2023). Fatigue resistance of monolithic and multilayer zirconia crowns using veneer layering or CAD-on technique. *Brazilian Dental Journal*, 34(6), 150–159.
- Toms, S., & Eberhardt, A. (2003). A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 123(6), 657–665.
- Trivedi, S. (2014). Finite element analysis: A boon to dentistry. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 4(4), 200–203.
- Ueda, C., Markarian, R. A., Sendyk, C. L., & et al. (2004). Photoelastic analysis of stress distribution on parallel and angled implants after installation of fixed prostheses. *Brazilian Oral Research*, 18, 45–52.
- Ugarte, R., & Cattaneo, P. (2021). Optimal intrusive force for a periodontally compromised tooth: A finite element analysis strategy. *Dental Materials*, 38, e28–e29.

- Uğurlu, M., & Sarı, F. (2022). A three-year retrospective study of clinical durability of bulk-filled resin composite restorations. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 47(1), e5.
- Valente, F., Scarano, A., Murmura, G., Varvara, G., Sinjari, B., Mandelli, F., & et al. (2021). Collagen fibres orientation in the bone matrix around dental implants: Does the implant thread design play a role? *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 7860. <https://doi.org/10.3390/ijms23217860>
- Valente, F., Falconio, L., Falcinelli, C., Roy, S., Trubiani, O., & Traini, T. (2023). Artificial intelligence and finite element analysis: Applications in implant dentistry. *Italian Journal of Anatomy and Embryology*, 127(2), 99–103.
- Vautrin, A., Zysset, P., & Varga, P. (2025). Influence of key modeling assumptions on the finite element prediction of dental implant primary stability. *Computers in Biology and Medicine*, 195, 110587. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.110587>
- Wang, P. S., Tsai, M. H., Wu, Y. L., et al. (2023). Biomechanical analysis of titanium dental implants in the All-on-4 treatment with different implant–abutment connections: A three-dimensional finite element study. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(10), 515.
- Wang, Y., Akbari, A., Jiang, F., et al. (2022). The effects of different types of periodontal ligament material models on stresses computed using finite element models. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 162(6), e328–e336.
- Wang, Y., & Chen, L. (2024). Advancements in finite element analysis for prosthodontics. *Progress in Medical Devices*, 2(4), 187–202.
- Wang, Y., Du, S., Zhu, H., et al. (2024). A finite element analysis of periodontal ligament fluid mechanics response to occlusal loading based on a hydro-mechanical coupling model. *Archives of Oral Biology*, 164, 106008.
- Wu, A. Y. J., Hsu, J. T., Fuh, L. J., et al. (2020). Biomechanical effect of implant design on four implants supporting mandibular full-arch fixed dentures: In vitro test and finite element analysis. *Journal of the Formosan Medical Association*, 119(10), 1514–1523.
- Xing, J., Zhang, G., Sun, M., et al. (2024). Clinical insights into tooth extraction via torsion method: A biomechanical analysis of the tooth–periodontal ligament complex. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1479751.
- Xu, H., & Li, X. (2021). Influence of framework materials on stress distribution in posterior fixed partial dentures: A 3D finite element analysis. *Polymers*, 13(14), 2321.
- Ye, J., Ye, H., Yu, X. X., et al. (2022). Timing selection for loosened tooth fixation based on degree of alveolar bone resorption: A finite element analysis. *BMC Oral Health*, 22(1), 328.
- Yu, P.-S., Yoo, Y.-S., & Kim, K.-W. (2001). A photoelastic study of the stress distribution on canine retraction by segmented TMAT-loop spring. *Korean Journal of Orthodontics*, 31, 199–207.
- Zak, B. (1935). Photoelastic analysis in der orthodontischen Mechanik. *Österreichische Zeitschrift für Stomatologie*, 35, 22–37.
- Zandman, F. (1959). Photoelastic coating test. In R. McMaster (Ed.), *Nondestructive testing handbook* (pp. 1–59). Ronald Press.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Zühlke, A., Gasik, M., Shahramian, K., et al. (2021). Enhancement of gingival tissue adherence of zirconia implant posts: An in vitro study. *Materials*, 14(3), 455.