

## Protetik Diş Tedavisinde Sonlu Elemanlar Analizi

Nur Sena Alioğlu Koparal<sup>1</sup>

Neslihan Güntekin<sup>2</sup>

Ali Rıza Tunçdemir<sup>3</sup>

### Özet

Diş hekimliğinde yapılacak olan çalışmaların klinik ortamındaki teknik yetersizlikler, hasta üzerinde uygulanması gerektiğinde etik sebeplerden ve materyallerin maliyetinden dolayı gerçekleştirilebilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Özellikle mühendislikle ilgili alanlarda uzun yıllardır kullanılan, diş hekimliği alanında ise yaklaşık 50 yıldır kullanılan sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi bu tip sorunları aşarak normal şartlarda gerçekleştirilmesi teknik zorluk içeren çalışmaların sanal ortamda tekrarlanabilir bir şekilde gerçekleştirilebilmesini sağlar. Bu nedenle FEA yöntemi diş restorasyonlarının malzeme ve yapısının geliştirilmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. FEA kuvvet, stres ve materyal özelliklerini değerlendiren protetik diş tedavisi alanında yapılan çalışmalarda birçok soruna basit ve hızlı uygulanabilir sonuçlar sunmuştur. FEA metodu kullanılarak araştırması yapılan konular hakkında güvenilir ve hızlı çözümler bulunurken, birçok klinik çalışmanın yapılabilmesine de ışık tutmakta ve rehberlik etmektedir. Bu derleme çalışmasında FEA metodu hakkında bilgi edinilerek diş hekimliğinde özellikle de protetik diş tedavisi ile ilgili çalışmalardaki kullanılabilirliği ve güvenilirliği hakkında yapılmış çalışmaların ve yazılmış bilimsel yazıların incelenmesi hedeflenmiştir.

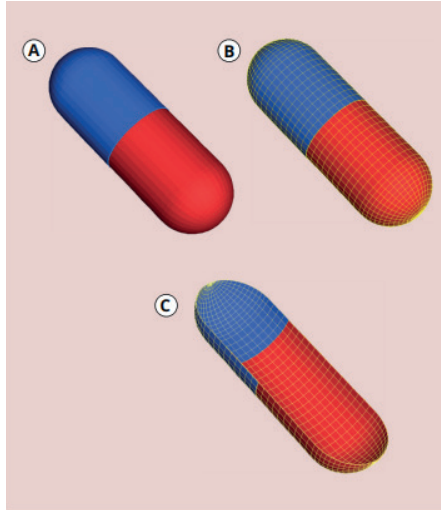
- 1 Arş. Gör., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, dtnursena@gmail.com, 0009-0008-7733-6879
- 2 Dr. Öğr. Üy., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, neslihanvarolnv94@gmail.com, 0000-0003-1432-5730
- 3 Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, alirizatuncdemir@gmail.com, 0000-0002-6114-3369

## 1. Giriş

Sonlu elemanlar analizi (FEA), bir maddeye kuvvet uygulandığı zaman o kuvvete karşı farklı malzemelerin nasıl tepki göstereceğini öngörmeyi sağlayan hesaplamalı bir sanal modelleme yöntemidir. ‘Parçadan bütüne gitme’ ilkesine göre çalışan yöntem esas olarak bir yapının genel karakteristiğini tayin etmek amacıyla kullanılmaktadır [1, 2]. Özellikle bilim ve mühendislik alanlarındaki karmaşık fiziksel olayların denklemlerini çözmek için denklemleri sanal sayısal modellere dönüştüren bir yöntemdir. Sonlu eleman analizi 1950’li yıllarda mühendislik alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu analizin uygulanabilmesi için önce sanal geometrik model elde edilmelidir.

### 1.1 Sonlu Eleman Analizi Nedir?

Sonlu eleman analizi, bir sorunu tanımlayan fiziksel modeli alır ve onu ‘sonlu’ boyutlara sahip daha küçük ‘öğeler’den oluşan uygun bir diziye böler. Bu daha küçük “sonlu elemanlar” birleştirildiğinde incelenen yapının “ağ” modelini oluştururlar (Şekil 1)[3]. Oluşturulan sanal modeller sayesinde klinik ve laboratuvar ortamında sonuçlarının değerlendirilmesi zor olan fiziksel davranışların değerlendirilmesini sağlar.



Şekil 1: İki parçalı farmasötik kapsülün şeması (A) Katı model; (B) Sonlu elemanlar ağı; Ve gösterilenin (C) kesit görüntüsü [3].

FEA, laboratuvar deneylerine veya klinik araştırmalara olan ihtiyacı azaltılmasına yardımcı olur. Teorik olarak ölçülebilen stres noktaları da

atayabildiği için uygulanan kuvvetin büyüklüğünü, yönünü ve konumunu belirlemeye de imkan sağlar.

FEA'nın üç aşaması vardır:

**Hazırlık (Pre-processing) Safhası:** Bilgisayar ortamında bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak model oluşturulabilir. Model manyetik rezonans (MR) ve bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleri ile elde edilebildiği gibi koordinatlar belirlenerek de elde edilebilir. Analiz etmek için oluşturulan model elemanlara ayrılarak bir ağ(mesh) yapısına dönüştürülür. Bu sayede matematiksel model hazırlanır [4, 5].

**Çözüm (Analiz) Safhası :** Elde edilen modelde bulunan farklı materyallerin mekanik özellikleri ile yükleme şartları tanımlanır. Uygulanacak kuvvetin özellikleri belirlenir. Yüklemeler sonucunda elde edilen bilgiler kaydedilir [4, 5].

**İşlem Sonu Düzenleme (Post-processing) Safhası:** İncelemesi yapılan materyalin mekanik özelliklerine dikkat edilerek değerlendirmesi yapılır. Örneğın porselen, greft materyalleri ve kemik gibi kırılabilen maddeler için farklı değerler, metaller gibi çekilebilen materyaller için farklı değerler kullanılır.

FEA'nın uygulama adımları şöyledir:

1. İncelenecek maddenin geometrisinin oluşturulması
2. Matematiksel modellerin elde edilmesi
3. Malzeme özelliklerinin tanımlanması
4. Modelin sınır koşullarının ve etki edecek yüklerin belirlenmesi

Yapılacak olan analiz yönteminin seçilmesi.[6, 7]

Ortaya çıkan matematiksel model ağ (mesh) olarak tanımlanır. Ağ yapısını elemanlar (elements), bunlarla alakalı düğüm noktaları (nodes) ve sınır koşulları (boundary conditions) oluşturur. Ağı oluşturan çizgilerin kesişimine düğüm noktası denir. Ağı birleştiren çizgilerin arasında oluşan iki ya da üç boyutlu yapıya da eleman denir [8].

Sonlu eleman analizinde çeşitli programlar kullanılır. Bu programlara ABAQUS, ANSYS, COMSOL, FEMPRO, FEMTOOLS, I-DEAS, NASTRAN, PAFEC75, PROENGINEER, SAP 80, SAP 2000, VISUALFEA örnek verilebilir.

FEA yöntemiyle sorunlara çözüm bulunabilmesi için bilgisayara bazı verilerin işlenmesi gerekmektedir. Bu veriler aşağıda yazılmıştır:

1. Nesnenin geometrisini oluşturacak koordinatlar,
  2. Nesnenin geometrisi ve ebatı için uyumlu eleman türü,
  3. Elemanların poisson oranı ve elastisite modülü değerleri,
  4. Elde edilen modele uygulanacak kuvvetler,
  5. Elde edilen modelin sınır koşulları,
- Yapılacak olan analiz türü [6, 9, 10]

FEA'nın doğruluğu, sonuçlarının deneysel testlerle karşılaştırılmasıyla belirlenir. FEA'da tüm malzemelerin homojen ve hatasız olduğu kabul edilmektedir. Ancak deneysel test için çene kemiğinde defektler gözlenebilmektedir. Deneysel testte gerinim ölçerler kullanılır ve ardından kemik ve implanttaki gerilmeler hesaplanır. FEA'nın doğruluğu, kişinin deneysel sonucu karşılaştırırken ne kadar toleransa izin verdiğiyle bağlıdır [11].

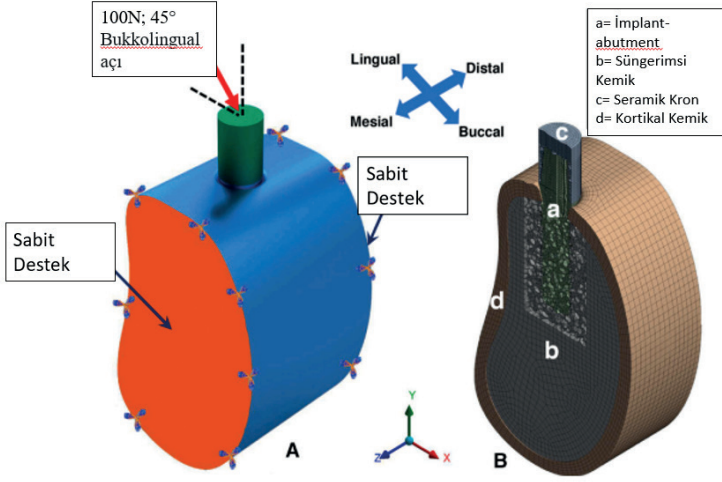
## **2. Diş Hekimliğinde Sonlu Eleman Analizi**

1976 yılında FEA yöntemi, implant diş hekimliği çalışmalarında kullanılmıştır [12]. 1979 yılında Mohammed ve Atmaram bir adet implantın ve üzerindeki dişin üzerine gelen stres dağılımını değerlendirmiş, implant uzunluğunun ve geometrisinin peri-implant dokular üzerindeki oluşturduğu elastik değişkenleri incelemişlerdir [13]. 1983 yılında ise Borchers ve Richard 3 boyutlu FEA yöntemi ile kemik implant arayüzünün gelişimini değerlendirmişlerdir [14]. FEA yöntemi, inlay, onlay, kuron, implant gibi diş restorasyonlarında yapısal, termal veya diğer analizlerde sıklıkla ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kemik ve dental implantlardaki stres/gerilmeleri incelemek için birçok farklı yöntem kullanılmıştır. FEA matematiksel model içindeki herhangi bir konumda tam nicel veri sağlayabilmektedir. Bu nedenle FEA, diş hekimliğinde implant sistemlerinin değerlendirilmesinde önemli bir analitik araç haline gelmiştir [11].

2004 yılında Fanuscu ve arkadaşları maksilla posterior alanda implant uygulanması esnasında yapılan sinüs lifting işlemi ile alakalı FEA yöntemini kullanarak çalışma yapmıştır [15]. Zampelis ve arkadaşları açılı yerleştirilmiş implantlarla alakalı FEA çalışması gerçekleştirmiştir [16]. Sannino All-on-four implant tarzıyla ilgili bir FEA çalışması yapmıştır [17].

İmplantlarının elastisite modülünün alveol kemiğindeki stres dağılımına etkisi FEA yöntemi ile incelenmiştir [18].



*Şekil 2: A) İmplantın, kemiklerin ve seramik kronun 3 boyutlu modeli. B) İmplantı, seramik kron, kortikal ve süngerimsi kemiklerin 3 boyutlu kesitli örgülü modeli [19].*

Travma cerrahisi alanında FEA'ya dayanarak araştırmacılar üçüncü azı dişlerinin varlığının mandibular aının zayıflığı üzerindeki etkisini test ettiler [20].

De Asiss ve arkadaşları ortognatik cerrahi alanında cerrahi yardımla hızlı üst çene genişletme (SARPE) sonrası kemik stresinin ölçülmesi ile ilgili bir FEA alışması yapmışlardır [21].

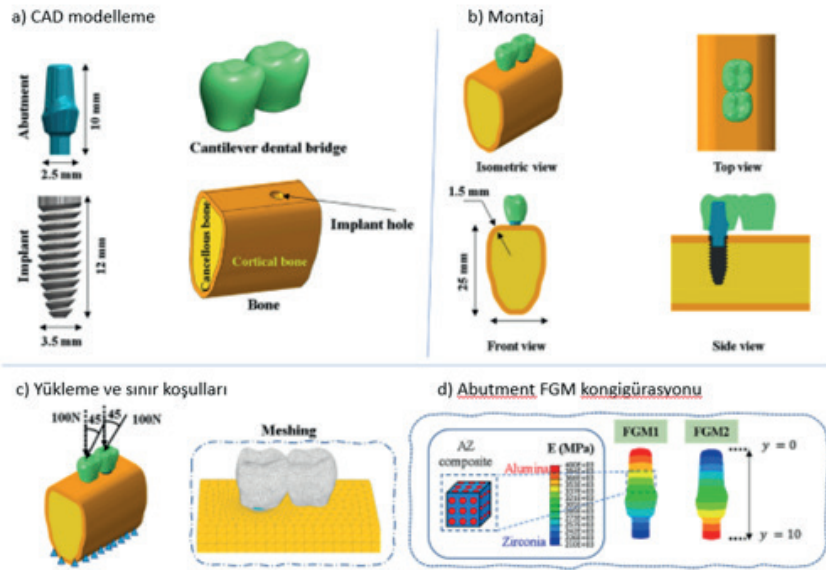
Restoratif diş hekimliğinde diş çürükleri, kırık dişler, aşınmış dişlerin kaybedilen diş dokusunun yerine kompozit, amalgam vb. dolgu materyalleri kullanılarak dolgu yapılmaktadır. Restoratif diş tedavisinde diş dolgularının biyomekanik analizi, diş dolguları veya diş dokularındaki stresi veya gerilimi ölçmek için sınırlı klinik test teknikleri göz önüne alındığında sonlu elemanlar analizi avantaj sağlamaktadır. FEA, biyomekanik açısından diş dolgularının özelliklerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. FEA sayesinde dolgunun uyumluluğu, klinik davranışı ve mekanik özellikleri gibi biyomekanikler belirlenebilir ve analiz edilebilir. Dişle ilgili yapılar alanında yapılan analizler, özellikle olası mekanik arızalar göz önüne alındığında, diş dolgularının performansını tahmin etmede faydalıdır.

## 2.1 Protetik Diş Tedavisinde Sonlu Eleman Analizi

Diş hekimliğinin biyomekanik ile her zaman sıkı bir şekilde ilişkilendirilen alanı protetik diş tedavisidir. Protetik diş tedavisinde kaybedilen diş ve destek dokusunun yerine konulması amacıyla metal, porselen, zirkonya, tam seramik

başlıca olmak üzere birçok materyal kullanılmaktadır. Bu materyaller aşınma direnci, elastisite modülü, gerilme direnci, stres dağılımı gibi daha birçok farklı özelliklere sahiptirler. Sonlu eleman analizi protetik tedavide kullanılan kron, köprü, implant üstü protez gibi uygulamalarda kullanılan materyallerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

İmplant üstü protezlerin oklüzal yükleri iletme açısı, şekli, kullanılan materyalin biyomekanik özellikleri ve oklüzyon tipi implant çevresi dokulardaki stres faktörünü değiştirerek klinik başarıyı etkilemektedir. Düz ve açılı yerleştirilen ve üzerinde sabit protetik restorasyonların bulunduğu implantlar arasındaki stres dağılımının farkını incelenmiş[22], horizontal yüklerde anlamlı bir fark gözlenmezken, vertikal kuvvetlerde açılı yerleştirilen implantlar ve implantların çevresinde 5 kat daha fazla stres biriktiği gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda kısa boylu implantlarda kron/implant oranının stres dağılımına etkisi araştırılmış, kron/kök oranı 2/3 olması ideal olarak belirlenmiş fakat 1/1 oranı en düşük değer olarak kabul edilebilir olduğu bildirilmiştir [23].



Şekil 3: a) CAD-CAM modelleme, b) Montaj, c) Yükleme ve sınır koşulları, d) Abutment FGM konfigürasyonu [24].

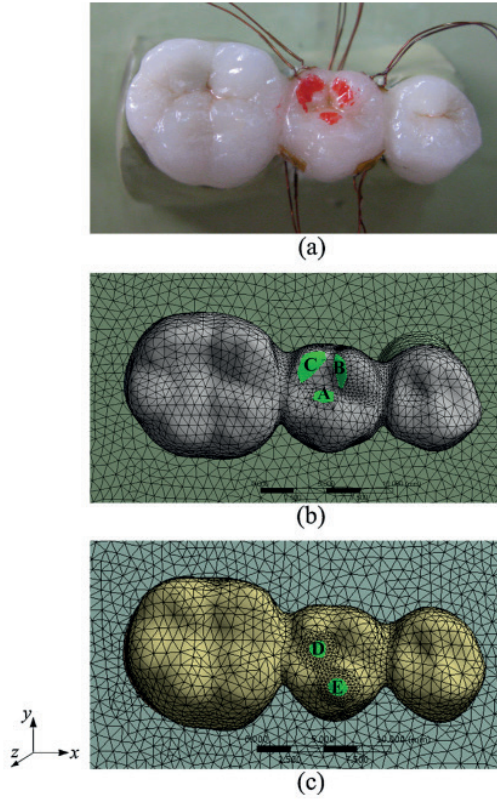
İmplant komplikasyonlarının ve kayıplarının engellenmesi hedefiyle oluşabilecek biyomekanik etkilerin önceden anlaşılması önemlidir [25]. Bu biyomekanik etkilerin bilgisayar ortamında değerlendirilmesi amacıyla da FEA kullanılır.

Post-kor uygulaması kronunun büyük bölümünü kaybetmiş bir dişin kök kanalı içerisine yerleştirilen vida benzeri bir yapıdan destek alınarak kron kısmının oluşturulmasını sağlayan protetik bir uygulamadır. FEA, endodontik tedavi görmüş dişlerin post yerleştirilmiş restorasyonlarla birlikte stres dağılımlarını analiz etmek ve kırılma potansiyelini tahmin etmek için kullanılmıştır [26, 27].

FEA tam ark vida tutuculu implant destekli sabit bölümlü protezde maksimum gerilmelerin protez bağlantı vidalarının başı ile birinci diş arasındaki bağlantıda yoğunlaştığını göstermiştir [28]. Bu çalışma aynı zamanda maksimum stres değerinin hem abutment hem de protez vidalarının yivsiz gövdesinde yoğunlaştığını gösterdi.

Sakaguchi ve arkadaşları FEA yöntemiyle implantların restoratif bileşenlerinin biyomekanik performansını değerlendirmiş ve eşit olmayan yüklemenin kuron ile dayanak arasında ve kuron ile vida arasında bir ayrılmaya neden olduğu sonucuna varmıştır [29].

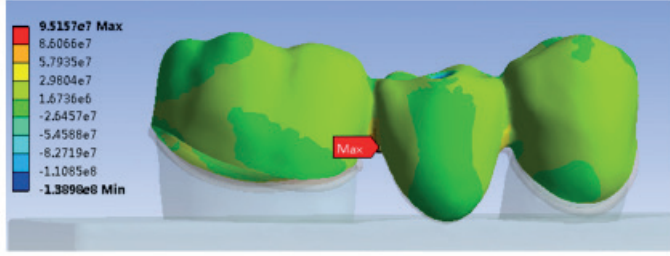
2011 yılında Dental Materials dergisinde yayınlanan bir makalede tam seramik sabit diş protezlerinde konnektör tasarımı, malzeme bileşimi ve kaplamanın stres dağılımı üzerindeki etkisi ele alınmıştır [30]. Bu çalışmada konnektörlerin bazal yüzeyinde çekme stresi pikleri ortaya çıkmıştır; stresler, bir çatlakın yüksek gerilme stresi bölgesinden oklüzal yüzeye doğru ilerlediği protezlerin başarısızlığından esas olarak sorumludur. Bu FEA şunu göstermiştir hem çerçevenin tasarımı hem de malzeme özellikleri kaplamanın gerilme dağılımında önemli bir rol oynar.



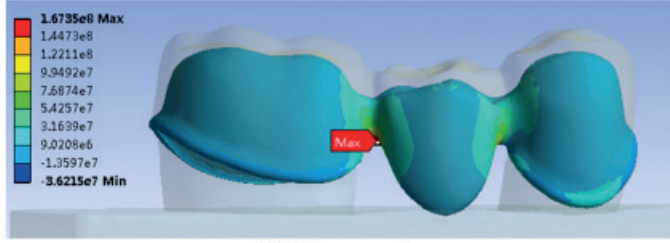
*Şekil 4: Yükleme alanlarının belirlenmesi. (a) İn vitro deneydeki yükleme alanları; (b) deneysel FEA modelindeki yükleme alanları; (c) klinik FEA modelindeki yükleme alanları[31].*

Yapılan bir çalışmada elektronik gerinim ölçümünün, sabit bir bölümlü protezdeki gerinim ve gerilimi araştırmak ve protezin FEA modelini doğrulamak için uygun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır [31].





(a) Veneer layer



(b) Framework

Şekil 5: (a) veneer tabakasının ve (b) altyapının 600 N oklişzal kuvvete maruz kaldığında birinci prensip gerilim dağılımı [31].

### 3. Sonuç

Protetik Diş Tedavisi alanında sonlu elemanlar analizi kullanımı, klinik çalışmalarda karşılaşılan sorunlara in vitro şartlar altında çözüm üretme imkanı sağlamıştır. Özellikle de klinik çalışmalarda aynı şekilde tekrarlanmasının imkanı olmayan deneylerin, farklı yollarla istenildiği kadar tekrarlanabilmesine ve etik sebeplerle hastalar üzerinde uygulanması mümkün olmayan deneylerin herhangi bir etik sorumluluk olmadan yapılabilmesine imkan sağlaması bakımından kullanımı kolay bir yöntemdir. FEA çalışmalarında incelenen materyalin özellikleri ve dokunun yaklaşık olarak modele aktarılsa hassas yapılan çalışmalar neticesinde gerçeğe en yakın değerler elde edilebilmektedir. Geliştirilen sonlu elemanlar analizi yöntemi ile diş hekimliği ve protetik diş tedavisi alanında başarıyı arttırmakta ve hekimlere rehberlik etmektedir.

## Kaynakça

1. Alkan, I., A. Sertgöz, and B. Ekici, *Influence of occlusal forces on stress distribution in preloaded dental implant screws*. J Prosthet Dent, 2004. **91**(4): p. 319-25.
2. Jacob Fish , T.B., *A First Course in Finite Elements*. 2007, England.
3. Choi, A.H., R.C. Conway, and B. Ben-Nissan, *Finite-element modeling and analysis in nanomedicine and dentistry*. Nanomedicine (Lond), 2014. **9**(11): p. 1681-95.
4. Iplikçioğlu, H., et al., *Comparison of non-linear finite element stress analysis with in vitro strain gauge measurements on a Morse taper implant*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2003. **18**(2): p. 258-65.
5. Magne, P., *Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data*. Dent Mater, 2007. **23**(5): p. 539-48.
6. Srirekha, A. and K. Bashetty, *Infinite to finite: an overview of finite element analysis*. Indian J Dent Res, 2010. **21**(3): p. 425-32.
7. Van Staden, R.C., H. Guan, and Y.C. Loo, *Application of the finite element method in dental implant research*. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2006. **9**(4): p. 257-70.
8. Küçük Kurt, S., *SONLU ELEMENLAR STRES ANALİZ YÖNTEMİ VE DENTAL İMPLANTOLOJİ ALANINDA YAPILAN ARAŞTIRMALAR*. Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 2019.
9. MOAVENİ, S., *Finite element analysis theory and application with ANSYS*. 2007.
10. Shetty, P., A. Hegde, and K.J.J.o.C.P.D. Rai, *Finite element method—an effective research tool for dentistry*. 2010. **34**(3): p. 281-285.
11. Parkhe, N., et al., *Enhancing dental implant model by evaluation of three-dimensional finite element analysis*. 2015. **4**(12): p. 26-33.
12. Geng, J.P., K.B. Tan, and G.R. Liu, *Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature*. J Prosthet Dent, 2001. **85**(6): p. 585-98.
13. Atmaram, G.H., H. Mohammed, and F.J. Schoen, *Stress analysis of single-tooth implants. I. Effect of elastic parameters and geometry of implant*. Biomater Med Devices Artif Organs, 1979. **7**(1): p. 99-104.
14. Borchers, L. and P. Reichart, *Three-dimensional stress distribution around a dental implant at different stages of interface development*. J Dent Res, 1983. **62**(2): p. 155-9.
15. Fanuscu, M.I., H.V. Vu, and B. Poncet, *Implant biomechanics in grafted sinus: a finite element analysis*. J Oral Implantol, 2004. **30**(2): p. 59-68.

16. Zampelis, A., B. Rangert, and L. Heijl, *Tilting of splinted implants for improved prosthodontic support: a two-dimensional finite element analysis*. J Prosthet Dent, 2007. **97**(6 Suppl): p. S35-43.
17. Sannino, G., *All-on-4 concept: a 3-dimensional finite element analysis*. J Oral Implantol, 2015. **41**(2): p. 163-71.
18. Dias Corpa Tardelli, J., et al., *Influence of the modulus of elasticity of dental implants on the distribution of stresses in the alveolar bone by the finite element method: A systematic review*. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology, 2023. **35**(5): p. 383-389.
19. Arabbeiki, M., M.R. Niroomand, and G. Rouhi, *Improving dental implant stability by optimizing thread design: Simultaneous application of finite element method and data mining approach*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2023. **130**(4): p. 602.e1-602.e11.
20. Bezerra, T.P., et al., *Do erupted third molars weaken the mandibular angle after trauma to the chin region? A 3D finite element study*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2013. **42**(4): p. 474-80.
21. de Assis, D.S., et al., *Finite element analysis of bone stress after SARPE*. J Oral Maxillofac Surg, 2014. **72**(1): p. 167.e1-7.
22. Canay, S., et al., *Comparison of stress distribution around vertical and angled implants with finite-element analysis*. Quintessence Int, 1996. **27**(9): p. 591-8.
23. Ersan Çelik, A.N.Ö., *Dinamik Yükleme Yapılan Kısa İmplantlarda Kron/İmplant Oranının Stres Dağılımına Etkisinin İncelenmesi*. Selcuk Dental Journal, 2019.
24. Ouldyyerou, A., et al., *Functionally graded ceramics (FGC) dental abutment with implant-supported cantilever crown: Finite element analysis*. Composites Communications, 2023. **38**: p. 101514.
25. Reddy, M.S., R. Sundram, and H.A. Eid Abdemagy, *Application of Finite Element Model in Implant Dentistry: A Systematic Review*. J Pharm Bioallied Sci, 2019. **11**(Suppl 2): p. S85-s91.
26. Lanza, A., et al., *3D FEA of cemented steel, glass and carbon posts in a maxillary incisor*. Dental Materials, 2005. **21**(8): p. 709-715.
27. Wang, Q., et al., *Effect of Access Cavities and Canal Enlargement on Biomechanics of Endodontically Treated Teeth: A Finite Element Analysis*. Journal of Endodontics, 2020. **46**(10): p. 1501-1507.
28. Sertgöz, A., *Finite element analysis study of the effect of superstructure material on stress distribution in an implant-supported fixed prosthesis*. Int J Prosthodont, 1997. **10**(1): p. 19-27.
29. Sakaguchi, R.L. and S.E. Borgersen, *Nonlinear finite element contact analysis of dental implant components*. Int J Oral Maxillofac Implants, 1993. **8**(6): p. 655-61.

30. Möllers, K., et al., *Influence of connector design and material composition and veneering on the stress distribution of all-ceramic fixed dental prostheses: A finite element study*. Dental Materials, 2011. 27(8): p. e171-e175.
31. Wang, G., et al., *Verification of finite element analysis of fixed partial denture with in vitro electronic strain measurement*. Journal of Prosthodontic Research, 2016. 60(1): p. 29-35.