

Sonlu Elemanlar Stres Analizi Yönteminin İmplant Cerrahisinde Kullanımı

Melek Beder¹

Hatice Yemenoğlu²

Özet

Dental implant cerrahisi, memnun edici fonksiyon ve estetik kazanımlar nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen tedavi seçeneği halini almıştır. İmplant uygulamalarında başarı sağlamak için önemli noktalar vardır. Uygun yüklenme, lokasyon seçimi ve implant geometrisinin doğru seçilememesi; implantların stabilitesi ve osteoentegrasyonunun in-vivo ortamda değerlendirilmesinde yaşanan zorluklar sebebiyle, in-vitro ortam koşullarında bir takım çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar stres analizi (SESA); dental materyaller ve implantların mekanik davranışlarını değerlendirmenin bir yolu olarak son 20 yılda kullanımı artan, biyomekanik problemleri küçük parçalara bölerek çözen bilgisayar destekli tasarım modellerinde stres ve gerilmeleri hesaplayan analiz tekniğidir. Bu bölüm, SESA hakkında ayrıntılı bilgi vermesinin yanısıra araştırmacılara dental implant uygulamaları için de ışık tutabilir.

1. Giriş

Son yıllarda, dental implantlar ile tedavi, doğal dişler kaybolduğunda veya kısmen hasar gördüğünde elverişli fonksiyon ve estetik sonuçlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.¹⁻³

Bu nedenle implantlar, ısırma yüklerini kemiğe ve çevre dokulara optimize edilmiş olarak dağıtacak şekilde tasarlanmalıdır.^{4,5} Dental implantların ve kemiğin biyomekanik davranışını analiz etmek için in-vitro teknikler ve sayısal simülasyonlar dahil olmak üzere çeşitli araçlar vardır. İn-vitro çalışmalar,

1 Arş.Gör., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Periodontoloji Ana Bilim Dalı, Rize/Türkiye, melek.beder@erdogan.edu.tr, Orcid:0009-0000-1483-3132

2 Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Periodontoloji, Ana Bilim Dalı, Rize/Türkiye, hatice.yemenoglu@erdogan.edu.tr, Orcid: 0000-0002-2532-2896

uluslararası standartların olduğu statik ve dinamik performansın fotoelastik stres analizini veya mekanik kırılma testlerini içerir.⁶ En yaygın sayısal simülasyon, sonlu elemanlar stres analiz (SESA) yöntemidir.

2. Sonlu elemanlar stres analizi yöntemi

SESA, biyomekanik analizler için kullanılan biyolojik araştırma alanında yeni bir gelişmedir. Bu yöntemin temelinde, problem alanını çok daha basit ve küçük bölgelere ayırarak karmaşık bir mekanik probleme çözüm bulmaktır. Bu analizin çalışma prensibi “parçadan bütüne gitme” şeklindedir.^{7,8} Burada alan değişkenleri fonksiyonları ve şekli kullanılarak tahmin yapılabilir. SESA, parçadan bütüne gitme prensibine dayandığı için, çözüm fonksiyonu aramak yerine uygun şekilde parçaları birleştirerek çözümü bulan bir yöntemdir.⁹ SESA kullanarak diş hekimliğinde yapılan ilk çalışma Ledley ve Huang’ın 1968’de yaptıkları çalışmadır. Bu çalışmada, matematik modeli elde edilmiş bir dişe çeşitli yönlerde kuvvetler uygulanmış ve bu kuvvetlerin dişi destekleyen kemik dokusunda meydana getirdikleri gerilmeler değerlendirilmiştir.^{5,10} Geometrik model, özel bir yapıyı uyarmak ve sonlu eleman ağı oluşturmak için düğümlerle bağlanan küçük elemanlara ayrılır ve matematiksel denklemi uygulayan yazılımla çözülebilir.¹¹ SESA, çeşitli biyolojik çalışmalarda ve osteoentegre olmuş implantlarda destekleyici kemiğe uygulanan çigneme kuvvetlerinden kaynaklanan stres çalışmalarında mekanik yanıtları anlamak için biyomekanik analiz sağlar. Ayrıca biyolojik yapıları kopyalayan modellerle, bu modeller üzerinde mekanik kuvvetler oluşturarak anatomik yapıların materyalist özelliklerini değerlendirir.¹²⁻¹⁵ Sonlu eleman parametreleri hakkındaki en önemli veriler, yani ağ özellikleri, kemik özellikleri, yüklenme-sınır koşulları ve yakınsama kriterleri detaylandırılıp gözden geçirilmiştir. Son olarak kemik ve dental implantlardaki stres değerleri analiz edilmiştir.⁵ Modellerin oluşturulmasındaki son gelişmeler, bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleme ve segmentasyon algoritmalarının kalitesi, daha hızlı bilgisayarlar ve sonlu eleman modellemesinin doğruluğu, bireysel hasta anatomisinin benzerliğini büyük ölçüde geliştirmiştir.¹⁶⁻¹⁸

Stres analizi için SESA ile yapılan bir çalışma şu adımları içerir:¹⁹

1. Yapının değerlendirilmesi için bir modelin geliştirilmesi
2. Cismin sonlu elemanlara bölünmesi
3. Elementin düğüm yüklerinin belirlenmesi
4. Cismin sonlu eleman modeli elde etmek için montajı
5. Bilinen yüklerin sistemde uygulanması

6. Yapının nasıl desteklendiğini düğüm yer değişikliği ile belirtilmesi
7. Düğüm yer değişikliğini belirlemek için eş zamanlı lineer cebirsel denklemlerin çözümü
8. Düğüm ve eleman yer değişikliğinden gerinimlerin ve gerilmelerin hesaplanması

SESA'nın diğer yöntemlere göre birçok avantajı bulunmaktadır.²⁰ Bunlar;

- Karmaşık geometriye sahip katı cisimler modellenenebilir.
- Gerçeğe en yakın model, bilgisayar yazılımları sayesinde oluşturulabilir.
- İstenilen sayıda değişik malzeme ile farklı modeller oluşturulabilir.
- Gerilme dağılımı ve lokalizasyonları hassas bir şekilde oluşturulabilir.
- Uygulanan kuvvetlerin malzeme özelliklerinin, geometrilerinin kolayca değiştirilebilmesi ve analizin tekrarlanabilmesi mümkündür.
- Analiz sonuçları çok kısa sürede elde edilebilir.

Analize göre elde edilen değerler varyanslı olmayan cebirsel hesaplamalar sonucunda ortaya çıktığı için bu değerlerin istatistiksel analizi yapılamamaktadır. Elde edilen basma, çekme ve Von Mises Stres miktarları ve dağılımlarına bakılarak değerlendirme yapılır. En yüksek çekme stresleri maksimum asal gerilmeleri, en yüksek basma stresleri ise minimum asal gerilmeleri ifade eder. Pozitif değerler çekme streslerini, negatif değerler ise basma streslerini belirtmektedir. Cebirsel çözümleme sonunda her yük durumu için modelin herhangi bir noktasındaki tüm gerilmeler, gerinimler ve yer değiştirmeler bulunur.²¹

SESA yönteminin avantajları yanında birtakım dezavantajları da vardır.¹⁹

- Kullanılan bilgisayar sistem ve yazılımları çok pahalıdır.
- Analiz sırasında kullanılan programların teknolojideki gelişmelere bağlı olarak belli aralıklarla güncellenmeleri gerekmektedir.
- Analiz için alanında deneyimli kişilere ihtiyaç vardır.
- Sonuçların yorumlanması güçtür.
- Verilerin elde edilmesi ve aktarılması uygulayıcıya bağlıdır.

Bilgisayar destekli tasarım, sonlu elemanlar metodları ve bilgisayar simülasyonları diş hekimliğinde özellikle dental implantların tasarımında yeni bilgisayar teknolojileri ile birlikte büyük ölçüde kolaylaştırılan bir işlem haline

gelmiştir. SESA implantların yüzeyleri boyunca ve çevresindeki kemikteki streslerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaya ve ayrıca stresi azaltmak için protetik tedavi seçeneklerini tasarlamaya yardımcı olmaktadır. Bu yüzden üç boyutlu SESA yönteminin uzaydaki stres dağılımlarını daha gerçekçi ve detaylı bir biçimde yansıttığı gösterilmiştir.²² SESA yönteminin daha anlaşılabilir olması adına, uygulanırken kullanılan terimlerin açıklanması yararlı olacaktır.

Eleman (Element): Sonlu elemanlar yönteminde incelenecek alanın modeli, ‘eleman (element)’ olarak adlandırılan basit geometrik şekillere ayrılır. Oluşturulan model ne kadar çok sayıda elemana bölünürse o kadar gerçeğe yakın çıkarımlar elde edilir.²³ Modeli oluşturan elemanlar sanal stresler altında gerilme ve şekil değiştirmelerini, çevrelerindeki diğer elemanlara aktararak onları etkiler.^{24,25} Bu yöntemde elemanlar, geometrilerine göre; dörtgen, üçgen, paralelkenar; boyutlarına göre; tek, iki, üç, izoparametrik elemanlar olarak; düğüm sayısına ve düğüm sayısındaki bilinmeyenlere göre ise levha, plak, kabuk problemleri olarak sınıflandırılmaktadır.^{23,26,27}

Düğüm (Node): SESA yönteminde modelleri oluşturan elemanların birbirleriyle bağlandığı noktalara ‘düğüm (node)’ denir. Yöntem, bu düğümlerdeki değişiklikleri algılayıp matematiksel olarak hesaplamaya çalışır. Düğümlerin model üzerinde belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmiş olması gerekmektedir.^{23,26,27}

Ağ Yapısının (Mesh) Oluşturulması: Düğüm ve elemanların koordinatları, programlar üzerinde veya kullanıcı tarafından üretilen ağ yapma işlemi ile oluşturulur. Kullanıcının sisteme girdiği minimum bilgiye karşılık gelen değer otomatik bir şekilde düğüm noktalarını ve elemanları sıralar, numaralandırır. Kullanıcı ayrıca mesh üretilecek bölgelerin, hangisinde daha fazla ya da hangisinde daha az eleman yoğunluğu olacağına karar vermelidir. Mesh yapısı oluşturulurken modeller sonlu sayıda elemanlara ayrılır ve istenildiğinde eleman sayısını, tipini ve ağ üretim yöntemini değiştirerek farklı çözümlerle modifiye edilip üretilebilir.^{23,26,27}

Katı (Solid) ve Geometrik Modelleme: SESA yönteminde, kullanılan tüm parçaların bilgisayar ortamına aktarılıp model oluşturma aşaması en önemli ve ilk aşamadır. Böylece incelenecek cismin geometrisi gerçeğe yakın şekilde tam anlamıyla dijitale aktarılmış olur. Modelleme yapılırken CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) programlarından faydalanılır. Modellemede ki amaç, cismin üretilmeden önce istenilen şekilde olup olmadığını ve yeterli işlevi sağlayıp sağlamadığını kontrol etmektir.^{23,26,27}

Sınır Koşulları (Boundary Conditions): Analizi ve modellemesi yapılacak olan cismin nereden sabitlendiğini ve kuvvetin nereden uygulanması gerektiğini gösterir.^{23,26}

Verilerin Analizi: Bu analizde kullanılan materyalin mekanik özellikleri göz önüne alınır ve uygun yöntem seçilir. Sonuçlar değerlendirilirken; porsele, kemik, greft materyalleri için asal gerilme değerleri; metal gibi materyaller için ise cismin tamamında oluşan stres değerleri hakkında bilgi sağlayan Von Misses Stres değerleri kullanılır.^{23-25,28-30}

3. Dental İmplantoloji Alanında Yapılan SESA Çalışmaları

Geleneksel ve dar çaplı implantlarla ilgili yapılan bir SESA çalışmasına göre; SESA yöntemiyle geleneksel implantlarda dar çaplı implantlara göre boyun bölgesinde daha az stres oluştuğu ve ilgili bölgede kemik rezorpsiyonunun daha az olduğu görülmüştür.³¹ 2004 yılında Fanuscu ve ark.³² sinüs lifting işlemi ile ilgili yaptıkları bir SESA çalışmasında, üst çeneyi taklit eden model üzerinde uygulanan konvansiyonel implantlara lateral ve aksiyal kuvvetler uygulayarak stres analizlerini yapmıştır. 2007 yılında Zampelis ve ark.³³ açılı ve paralel yerleştirilen implantlarla ilgili yaptıkları bir SESA çalışmasında, stres birikiminin hangi noktalarda daha yoğun olduğunu araştırmışlardır. Wen ve ark.³⁴ yaptıkları bir çalışmada, aşırı atrofik bir üst çene modeli üzerine 3 zygomatik implant uygulayarak implant lokalizasyonunu ve sayısını optimum olarak belirlemeye çalışmıştır. Sannino'nun 2015 yılında yaptığı bir çalışmada ise oluşturulan model üzerinde, all-on-four tekniğiyle üst çene anterior-posterior bölgelere 4 adet implant yerleştirilip, açılı ve paralel uygulanan kuvvetlerle oluşturulan stresin analizi yapılmıştır.³⁵

Günümüze kadar dental implantoloji alanında SESA yöntemiyle uygulanan birçok çalışma yapılmıştır.³¹⁻³⁵ Etik sebeplerle klinikte uygulanamayan çalışmaların bilgisayar ortamında model oluşturularak yapılabilmesi ve/veya tekrarlanması olası olmayan çalışmaların sınırsız şekilde tekrarlanabilmesine olanak sağlaması açısından SESA yöntemi büyük bir avantaj oluşturabilir.

Kaynaklar

1. Calandriello, R.; Tomatis, M. Immediate occlusal loading of single lower molars using brånemark system® wide platform titanium™ implants: A 5-year follow-up report of a prospective clinical multicenter study. *Clin. Implant Dent. Relat. Res.* 2009, 13, 311–318. [CrossRef] [PubMed]
2. Bernardi, S.; Gatto, R.; Severino, M.; Botticelli, G.; Caruso, S.; Rastelli, C.; Lupi, E.; Roias, A.Q.; Iacomino, E.; Falisi, G. Short Versus Longer Implants in Mandibular Alveolar Ridge Augmented Using Osteogenic Distraction: One-Year Follow-up of a Randomized Split-Mouth Trial. *J. Oral Implantol.* 2018, 44, 184–191. [CrossRef] [PubMed]
3. Kim WH, Song ES, Ju KW, Lee JH, Kim MY, Lim D, Kim B. Finite Element Analysis of Novel Separable Fixture for Easy Retrieval in Case with Peri-Implantitis. *Materials* 2019, 12, 235
4. Scortecchi, G.; Misch, C.; Benner, K. *Implants and Restorative Dentistry*; Martin Dunitz: London, UK, 2001.
5. Prados-Privado M, NMartínez-Martínez C , Gehrke SA and Prados-Frutos JC. Influence of Bone Definition and Finite Element Parameters in Bone and Dental Implants Stress: A Literature Review. *Biology* 2020, 9, 224
6. Gehrke, S.A.; Frugis, V.L.; Shibli, J.A.; Fernandez, M.P.R.; Sánchez de Val, J.E.M.; Girardo, J.L.C.; Tascieri, S.; Corbella, S. Influence of Implant Design (Cylindrical and Conical) in the Load Transfer Surrounding Long (13 mm) and Short (7 mm) Length Implants: A Photoelastic Analysis. *Open Dent. J.* 2016, 10, 522–530. [CrossRef] [PubMed]
7. Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T, Igarashi Y, 2008. Nonlinear finite element analyses: advances and challenges in dental applications. *Journal of dentistry*, 36, 7, 463-71.
8. Ebrahimi F, 2012. *Finite Element Analysis: New Trends and Developments*, BoD–Books on Demand, p.
9. Geng J-P, Tan KB, Liu G-R, 2001. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *The Journal of prosthetic dentistry*, 85, 6, 585-9
10. Ledley, R. S., & Huang, H. K. (1968). Linear model of tooth displacement by applied forces. *Journal of dental research*, 47(3), 427-432.
11. Corrêa CB, Margonar R, Noritomi PY, Vaz LG, 2014. Mechanical behavior of dental implants in different positions in the rehabilitation of the anterior maxilla. *The Journal of prosthetic dentistry*, 111, 4, 301-9.
12. Martini AP, Barros RM, Júnior ACE, Rocha EP, de Almeida EO, Ferraz CC, Pellegrin MCJ, Anchieta RB, 2013. Influence of platform and abutment angulation on peri-implant bone. A three dimensional finite element stress analysis. *Journal of Oral Implantology*, 39, 6, 663

13. Sun J, Jiao T, Tie Y, Wang DM. Three dimensional finite element analysis of the application of attachment for obturator framework in unilateral maxillary defect. *J Oral Rehabil.* 2008;35:695-699
14. Gao J, Xu W, Ding Z. 3D finite element mesh generation of complicated tooth model based on CT slices. *Comput Methods Progr Biomed.* 2006;28:916-924
15. Bhattacharjee B, Saneja R, Singh A, Dubey PK, Bhatnagar A. Peri-implant stress distribution assessment of various attachment systems for implant supported overdenture prosthesis by finite element analysis – A systematic review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research* 12 (2022) 802–808
16. Bernardi, S.; Gatto, R.; Severino, M.; Botticelli, G.; Caruso, S.; Rastelli, C.; Lupi, E.; Roias, A.Q.; Iacomino, E.; Falisi, G. Short Versus Longer Implants in Mandibular Alveolar Ridge Augmented Using Osteogenic Distraction: One-Year Follow-up of a Randomized Split-Mouth Trial. *J. Oral Implantol.* 2018, 44, 184–191. [CrossRef] [PubMed]
17. Kim WH, Song ES, Ju KW, Lee JH, Kim MY, Lim D, Kim B. Finite Element Analysis of Novel Separable Fixture for Easy Retrieval in Case with Peri-Implantitis. *Materials* 2019, 12, 235
18. Poelert, S.; Valstar, E.; Weinans, H.; Zadpoor, A.A. Patient-specific finite element modeling of bones. *Proc. Inst. Mech. Eng. H* 2013, 227, 464–478. [CrossRef] [PubMed]
19. Ramođlu S, Ozan O, 2014. Diş hekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yontemi. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakóltesi Dergisi*, 24, 3.
20. Adıgüzel, Ö. (2010). Sonlu elemanlar analizi: Derleme bölüm I: Dişhekimliğinde Kullanım Alanları, Temel Kavramlar ve Eleman Tanımları. *Dicle Dişhekimliği Dergisi*, 11, 18-23.
21. Ulusoy, M., & Aydın, A.K. (2003). Diş Hekimliğinde Hareketli Bölümlü Protezler. Cilt I. Ankara. Ankara Üniversitesi Dişhekimliği Fakóltesi Yayınları, 94- 120
22. DeTolla, D. H., Andreana, S., Patra, A., Buhite, R., & Comella, B. (2000). The role of the finite element model in dental implants. *Journal of Oral Implantology*, 26(2), 77-81.
23. Geng J-P, Tan KB, Liu G-R. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *J Prosthet Dent.* 2001; 85(6): 585-98.
24. Logan DL, 2007. *A First Course in the Finite Element Method*, Cengage Learning, p.
25. Ramođlu S, Ozan O, 2014. Diş hekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yontemi. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakóltesi Dergisi*, 24, 3.

26. Şahin M, 2008. Dört farklı cam fiber postun in vitro bükülme dirençlerinin ve sonlu eleman metodu ile stres dağılımlarının analizi, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara
27. Adıgüzel Ö, 2010. Sonlu elemanlar analizi: Derleme bölüm I: Dişhekimliğinde Kullanım Alanları, Temel Kavramlar ve Eleman Tanımları. *Dicle Dişhekimliği Dergisi*, 11, 18-23.
28. Tabata LE, Assunção WG, Barão VAR, Gomes EA, Delben JA, de Sousa EAC, Rocha EP, 2010. Comparison of single-standing or connected implants on stress distribution in bone of mandibular overdentures: a two-dimensional finite element analysis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 21, 3, 696-702.
29. Ebrahimi F, 2012. *Finite Element Analysis: New Trends and Developments*, BoD-Books on Demand, p
30. Hong HR, Pae A, Kim Y, Paek J, Kim H-S, Kwon K-R, 2012. Effect of implant position, angulation, and attachment height on peri-implant bone stress associated with mandibular two-implant overdentures: a finite element analysis. *Int J Oral Max Impl*, 27, 5.
31. Valera-Jimenez, J.F., Burgueno-Barris, G., Gomez-Gonzalez S., LopezLopez, J., Valmaseda-Castellon, E., Fernandez-Aguado, E. (2019), Finite element analysis of narrow dental implants, *Dental Materials*,36:927-35
32. Fanuscu, MI., Vu, HV., Poncelet, B. (2004), Implant biomechanics in grafted sinus: A finite element analysis. *J. Oral Implantol*, 30: 59- 68.
33. Zampelis, A., Rangert, B., Heijl, L. (2007), Tilting of splinted implants for improved prosthodontic support: a two-dimensional finite element analysis. *J Prosthet Dent*, 97:35-43.
34. Wen, H., Guo, W., Liang, R. (2014), Finite element analysis of three zygomatic implant techniques for the severely atrophic edentulous maxilla, *J Prosthet Dent*, 111:203-15
35. Sannino, G. (2015), All-on-4 concept: a 3-dimensional finite element analysis. *J Oral Implantol*, 41:163-71.