

DİŞ HEKİMLİĞİNDE SONLU ELEMANLAR ANALİZİNİN KULLANIMI

*Ortodontik Biyomekanik ve Dijital
Simülasyon Yaklaşımları*

Yazar

Dr. Dt. Dler DEMİR



© Copyright 2025

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Kitabevi A.Ş.'ye aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kağıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN
978-625-375-750-2

Sayfa ve Kapak Tasarımı
Akademisyen Dizgi Ünitesi

Kitap Adı
Dış Hekimliğinde Sonlu
Elemanlar Analizinin Kullanımı

Yayıncı Sertifika No
47518

Yazar
Dler DEMİR
ORCID iD: 0000-0002-4745-7556

Baskı ve Cilt
Vadi Matbaacılık

Bisac Code
MED085000

Yayın Koordinatörü
Yasin DİLMEN

DOI
10.37609/akya.3891

Kütüphane Kimlik Kartı
Demir, Dler.

Dış Hekimliğinde Sonlu Elemanlar
Analizinin Kullanımı / Dler Demir.
Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2025.
69 s. : tablo. ; 135x210 mm.

Kaynakça var.
ISBN 9786253757502

UYARI

Bu üründe yer alan bilgiler sadece lisanslı tıbbi çalışanlar için kaynak olarak sunulmuştur. Herhangi bir konuda profesyonel tıbbi danışmanlık veya tıbbi tanı amacıyla kullanılmamalıdır. Akademisyen Kitabevi ve alıcı arasında herhangi bir şekilde doktor-hasta, terapist-hasta ve/veya başka bir sağlık sunum hizmeti ilişkisi oluşturmaz. Bu ürün profesyonel tıbbi kararların eşleniği veya yedeği değildir. Akademisyen Kitabevi ve bağlı şirketleri, yazarları, katılımcıları, partnerleri ve sponsorları ürün bilgilerine dayalı olarak yapılan bütün uygulamalardan doğan, insanlarda ve cihazlarda yaralanma ve/veya hasarlardan sorumlu değildir.

İlaçların veya başka kimyasalların reçete edildiği durumlarda, tavsiye edilen dozunu, ilacın uygulanacak süresi, yöntemi ve kontraendikasyonlarını belirlemek için, okuyucuya üretici tarafından her ilaca dair sunulan güncel ürün bilgisini kontrol etmesi tavsiye edilmektedir. Dozun ve hasta için en uygun tedavinin belirlenmesi, tedavi eden hekimin hastaya dair bilgi ve tecrübelerine dayanak oluşturmaya, hekimin kendi sorumluluğundadır.

Akademisyen Kitabevi, üçüncü bir taraf tarafından yapılan kitaba dair değişikliklerden sorumlu değildir.

GENEL DAĞITIM
Akademisyen Kitabevi A.Ş.

Halk Sokak 5 / A
Yenişehir / Ankara
Tel: 0312 431 16 33
siparis@akademisyen.com

www.akademisyen.com

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

GİRİŞ VE TARİHÇE.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Temel Mantığı.....	2
1.3. Tarihsel Gelişim Süreci.....	2
1.4. Dış Hekimliğinde FEA'nın Gelişim Evreleri	3
1.5. Dış Hekimliğinde FEA Kullanım Alanları.....	4
1.6. FEA'nın Avantajları ve Sınırlamaları.....	5
1.7. Sonuç ve Güncel Bakış.....	5

BÖLÜM 2

SONLU ELEMANLAR ANALİZİNİN MATEMATİKSEL

VE KURAMSAL TEMELLERİ	7
2.1. Giriş: Neden Matematik?.....	7
2.2. Gerilme, Gerinim ve Malzeme Cevabı.....	7
2.3. Young Modülü ve Poisson Oranı.....	9
2.4. Matematiksel Formülasyon: Sistem Denklemi.....	10
2.5. Lineer ve Non-Lineer Analiz	11
2.6. Sınır Koşulları ve Ankraj Tanımı	12
2.7. Mesh (Ağ Yapısı) ve Çözünürlük.....	12
2.8. Sonuçların Görselleştirilmesi: Renk Haritaları.....	13
2.9. FEA'nın Dış Hekimliğinde Yorumu: Kritik Noktalar	14

BÖLÜM 3

ORTODONTİDE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI.17

3.1. Ortodontide Kuvvet Sistemlerinin Sayısal Modellemesi.....	17
3.2. Gömülü Kanin Dişlerin Sürdürülmesinde FEA	18
3.3. Ballista Spring Sisteminin Biyomekanik Analizi.....	18

İçindekiler

3.4.	Elastik İplik Sistemlerinin FEA Karşılaştırması	19
3.5.	Ballista ve Elastik Sistemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	20
3.6.	Mini İmplant ve Ankraj Sistemlerinde FEA	20
3.7.	Saydam Plak (Aligner) Tedavilerinde FEA	22
3.8.	Braket–Tel Etkileşimi ve Sürtünme Kuvvetleri	22
3.9.	Sınıf III ve Kraniofasiyal Sistemlerde Kuvvet Dağılımı	23
3.10.	Klinik Önemi ve Gelecek Perspektifi	23
BÖLÜM 4		
MATERYAL VE METOT		25
4.1.	Giriş	25
4.2.	Görüntüleme ve Üç Boyutlu Model Oluşturma	25
4.3.	Geometrik Modelin Hazırlanması	26
4.4.	Materyal Özelliklerinin Tanımlanması	27
4.5.	Sınır Koşulları (Boundary Conditions)	28
4.6.	Kuvvet Türleri ve Uygulama Senaryoları	29
4.7.	Temas Tanımları ve Sürtünme Koşulları	30
4.8.	Çözümleme (Solver) Parametreleri	30
4.9.	Sonuçların Değerlendirilmesi	31
4.10.	Doğrulama (Validation) ve Literatür Karşılaştırması	32
4.11.	FEA Sürecinin Akış Şeması	32
BÖLÜM 5		
BULGULAR VE LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ		35
5.1.	Genel Bakış	35
5.2.	Model Sonuçlarının Genel Özellikleri	35
5.3.	Bulguların Klinik Yorumu	37
5.4.	Literatür ile Karşılaştırma	38
5.5.	Renk Haritalarının Klinik Değerlendirmesi	39
5.6.	Bulguların Biyolojik Anlamı	40
5.7.	Bulguların Klinik Uygulamalara Katkısı	40
5.8.	Literatürün Genel Eğilimi (2020–2025)	41

BÖLÜM 6

DİJİTAL ORTODONTİ VE GELECEĞE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR.....43

- 6.1. Giriş43
- 6.2. Dijital Ortodontinin Bileşenleri44
- 6.3. Kişisel Biyomekanik Modeller ve Dijital İkizler44
- 6.4. Yapay Zekâ (AI) Destekli FEA Sistemleri.....45
- 6.5. Bulut Tabanlı Analiz ve Klinik Entegrasyon46
- 6.6. Materyal Bilimindeki Gelişmeler47
- 6.7. Simülasyon Destekli Klinik Eğitim47
- 6.8. Kişiselleştirilmiş Tedavi Planlamasında FEA'nın Rolü.....48
- 6.9. Dijital Ortodontinin Etik ve Yasal Boyutu.....48
- 6.10. Geleceğe Bakış.....49

BÖLÜM 7

SONUÇ VE KLİNİK ÖNERİLER.....51

- 7.1. Genel Değerlendirme.....51
- 7.2. Ortodontik Tedavide FEA'nın Klinik Rolü.....52
- 7.3. Gömülü Kaninlerin Sürdürülmesinde
Elde Edilen Çıkarımlar53
- 7.4. Aligner Sistemlerinde Biyomekanik Denetim.....54
- 7.5. Ankraj Yönetimi ve Mini İmplantlar Açısından Sonuçlar.....55
- 7.6. FEA'nın Sınırları: Neyi Söyler, Neyi Söyemez?56
- 7.7. Klinik Pratiğe Yönelik Öneriler.....57
- 7.8. Gelecek Perspektifi58
- 7.9. Son Söz.....59

KAYNAKLAR.....60

KAYNAKLAR

1. Oliveira, T. C. P., Copello, F. M., Paes-Souza, S. A., Castro, A. C. R., Nojima, L. I., & Goncalves Nojima, M. D. C. (2023). Influence of the maxillary dimensions and lateral incisor anatomy on the palatal impaction of maxillary permanent canines: A three-dimensional case-control study. *International Orthodontics*, 21, 100804. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2023.100804>
2. Sokmen, T., Bagci, N., & Balos Tuncer, B. (2024). Buccolingual inclination of posterior dentition in maxillary impacted canine patients using quadrant analysis—A cone-beam computed tomographic study. *BMC Oral Health*, 24, 1012. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04178-1>
3. Gudeleviciute, I., Spaicyte, N., & Smailiene, D. (2023). Skeletal and dental maxillary morphological characteristics in patients with impacted canines: Systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*, 45, 832–841. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjad023>
4. Zhou, Y., Bi, M., Yang, H., He, X., Wang, X., Chen, Z., & Ji, F. (2025). Epidemiological and imaging characteristics of impacted maxillary incisors and effect on root development. *Scientific Reports*, 15, 13049. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13049>
5. Choi, Y. K., Kim, S. H., Kim, Y. I., Kim, S. S., Park, S. B., Choi, D. S., et al. (2025). Prevalence and characteristics of impacted teeth in Korean orthodontic patients at ten university dental hospitals. *Korean Journal of Orthodontics*, 55, 234–241. <https://doi.org/10.4041/kjod.2025.55.3.234>
6. Dekel, E., Nucci, L., Weill, T., Flores-Mir, C., Becker, A., Perillo, L., & Chaushu, S. (2021). Impaction of maxillary canines and its effect on the position of adjacent teeth and canine development: A cone-beam computed tomography study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 159(6), e135–e147. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.08.024>
7. Pineda-Mendez, A., Aliaga-Del Castillo, A., Rodriguez-Cardenas, Y. A., Ruiz-Mora, G. A., Dutra, V., & Arriola-Guillen, L. E. (2025). Frequency of odontogenic lesions in patients with impacted maxillary canines and the association with impaction characteristics. *Dental and Medical Problems*, 62, 479–485. <https://doi.org/10.17219/dmp/18249>
8. Al-Salmany, L. H. A., Hussein, L. K., & Altaee, Z. H. (2025). Impacted canine prevalence, localization, and related etiological factors among orthodontic sample of Fallujah city. *Journal of Orthodontic Science*, 14, 15. https://doi.org/10.4103/jos.jos_150_24
9. Papageorgiou, S. N., Seehra, J., Cobourne, M. T., & Kanavakis, G. (2025). Does current evidence support the discussion around the guidance theory? A systematic review and meta-analysis on the association between maxillary lateral incisor agenesis and displacement or impaction of the permanent canine. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 28, 312–323. <https://doi.org/10.1111/ocr.12615>

10. Philip-Alliez, C., & Le Gall, M. (2025). Prophylaxis of impacted canines: Prevention, diagnosis, and early management. *L'Orthodontie Française*, 96, 79–104. <https://doi.org/10.1051/orthodfr/2025008>
11. Araujo, V. Z., Heckmann, S., Araujo, F. B., Casagrande, L., Ziegelmann, P. K., Araujo, E. A., & Marques, L. S. (2023). Is there a better interceptive treatment for unerupted palatally displaced canines? A network meta-analysis. *Brazilian Oral Research*, 36, e119. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2023.vol36.0119>
12. Schroder, A. G. D., Guariza-Filho, O., de Araujo, C. M., Ruellas, A. C., Tanaka, O. M., & Porporatti, A. L. (2018). To what extent are impacted canines associated with root resorption of the adjacent tooth?: A systematic review with meta-analysis. *Journal of the American Dental Association*, 149, 765–777.e8. <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2018.04.010>
13. Baser, E. N., Akar, N. K., & Sayar, G. (2023). Effects of Ballista and Kilroy Springs on palatally impacted canines: A finite element model analysis. *Turkish Journal of Orthodontics*, 36, 30–38. <https://doi.org/10.5152/TurkJOrthod.2023.23117>
14. Zogakis, I. P., Anagnostou, C., Ioannidou, I., Chaushu, S., & Papadopoulos, M. A. (2025). A comparison of different biomechanical systems for the orthodontic treatment of palatally impacted canines. *Bioengineering*, 12, 267. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12030267>
15. Marinelli, G., Inchingolo, A. M., Inchingolo, A. D., Ferrante, L., Avantiario, P., Campanelli, M., ... Dipalma, G. (2025). Temporary anchorage devices in clear aligner therapy: A systematic review. *Bioengineering*, 12, 531. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12050531>
16. Waremani, A. S., & Ahmed, N. (2022). Effects of mandibular canine intrusion obtained using cantilever versus bone anchorage: A comparative finite element study. *Cureus*, 14, e27548. <https://doi.org/10.7759/cureus.27548>
17. Pinho, L. C., Santos, C., Fernandes, M. H., & Colaco, B. (2025). Canine periodontal ligament stem cells as a tool for periodontal regeneration. *Research in Veterinary Science*, 193, 105787. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2025.105787>
18. Nazeri, A., Castillo, J. A., Jr., & Ghaffari-Rafi, A. (2025). Impact of molar distalization with clear aligners on periodontal ligament stress and root resorption risk: A systematic review of 3D finite element analysis studies. *Dentistry Journal*, 13, 65. <https://doi.org/10.3390/dj13060065>
19. Verma, S., Singh, S. P., Verma, R. K., Kumar, V., Singh, S., & Bhupali, N. R. (2023). Success rate, treatment duration, and pain perception in the management of palatally impacted canines using the K9 and Ballista spring: A randomized clinical trial. *Angle Orthodontist*, 93, 33–40. <https://doi.org/10.2319/032122-231.1>

20. Yadav, S., Chen, J., Upadhyay, M., Jiang, F., & Roberts, W. E. (2011). Comparison of the force systems of 3 appliances on palatally impacted canines. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.12.045>
21. Inchingolo, F., Cardarelli, F., Settanni, V., & Palermo, A. (2024). Impacted teeth and temporary anchorage devices, a modern approach: Systematic review and clinical cases. *European Journal of Musculoskeletal Diseases*, 13, 65–82.
22. Oğuz, F., Özden, S., & Cicek, O. (2024). Distalization methods for maxillary molars utilizing temporary anchorage devices (TADs): A narrative review. *Applied Sciences*, 14, 1333. <https://doi.org/10.3390/app14031333>
23. Silva, A. C., Capistrano, A., Almeida-Pedrin, R. R., Cardoso, M. A., Conti, A. C., & Capelozza, L. F. (2017). Root length and alveolar bone level of impacted canines and adjacent teeth after orthodontic traction: A long-term evaluation. *Journal of Applied Oral Science*, 25, 75–81. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2016-0230>
24. Spuntarelli, M., Cecchetti, F., Arcuri, L., Testi, D., Melone, P., & Germano, F. (2015). Combined orthodontic-surgical approach in the treatment of impacted maxillary canines: Three clinical cases. *Oral Implantology*, 8, 63–67. <https://doi.org/10.11138/orl/2015.8.2.063>
25. Mosavar, A., Ziaei, A., & Kadkhodaei, M. (2015). The effect of implant thread design on stress distribution in anisotropic bone with different osseointegration conditions: A finite element analysis. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 30, 1317–1326. <https://doi.org/10.11607/jomi.3994>
26. Alemayehu, D. B., & Jeng, Y. R. (2021). Three-dimensional finite element investigation into effects of implant thread design and loading rate on stress distribution in dental implants and anisotropic bone. *Materials*, 14, 6974. <https://doi.org/10.3390/ma14226974>
27. Buchmann, N., Senn, C., Ball, J., & Brauchli, L. (2012). Influence of initial strain on the force decay of currently available elastic chains over time. *Angle Orthodontist*, 82, 529–535. <https://doi.org/10.2319/072111-473.1>
28. Raghav, P., Singh, K., Reddy, M., Joshi, D., & Jain, S. (2017). Treatment of maxillary impacted canine using Ballista spring and orthodontic wire traction. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 10, 313–317. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1443>
29. Chung-Leng, I., Beltri Orta, P., & De la Hoz Calvo, A. (2023). Radiographic assessment of unerupted permanent maxillary canines and their relationship to the phases of dentition in mixed dentition Spanish children: A retrospective cross-sectional study. *European Archives of Paediatric Dentistry*, 24, 711–718. <https://doi.org/10.1007/s40368-022-00714-5>
30. Nakandakari, C., Goncalves, J. R., Cassano, D. S., Raveli, T. B., & Raveli, D.

- B. (2016). Orthodontic traction of impacted canine using cantilever. *Case Reports in Dentistry*, 2016, 4386464. <https://doi.org/10.1155/2016/4386464>
31. Shastri, D., Nagar, A., & Tandon, P. (2014). Alignment of palatally impacted canine with open window technique and modified K-9 spring. *Contemporary Clinical Dentistry*, 5, 272–274. <https://doi.org/10.4103/0976-237X.132358>
 32. Elkolaly, M. A., & Hasan, H. S. (2022). MH cortical screws, a revolutionary orthodontic TADs design. *Journal of Orthodontic Science*, 11, 53. https://doi.org/10.4103/jos.jos_53_22
 33. Liu, Y., Zhang, S., Zeng, A., & Yan, P. (2022). Finite element analysis and polarization test of IDEs piezoelectric actuator. *Micromachines*, 13, 154. <https://doi.org/10.3390/mi13020154>
 34. Field, C., Ichim, I., Swain, M. V., Chan, E., Darendeliler, M. A., Li, W., & Li, Q. (2009). Mechanical responses to orthodontic loading: A 3-dimensional finite element multi-tooth model. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2007.03.029>
 35. Gautam, P., Valiathan, A., & Adhikari, R. (2009). Skeletal response to maxillary protraction with and without maxillary expansion: A finite element study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135, 723–728. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2007.07.028>
 36. Jacoby, H. (1979). The “Ballista Spring” system for impacted teeth. *American Journal of Orthodontics*, 75, 143–151. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(79\)90247-4](https://doi.org/10.1016/0002-9416(79)90247-4)
 37. Karakoyunlu, A. F., Gulec, A., & Ozkan, O. D. (2025). Three-dimensional finite element comparison of Ballista Spring and Elastic Thread systems in the traction of impacted maxillary canines: Implications for anchorage control. *Applied Sciences*, 15(17), 9639. <https://doi.org/10.3390/app15179639>
 38. Inchingolo, F., Inchingolo, A. M., Cardarelli, F., Settanni, V., & Dipalma, G. (2024). Temporary anchorage devices in clear aligner therapy: A systematic review. *Bioengineering*, 12(4), 531. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12040531>