



Aydın Dental Journal

Journal homepage: <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/adj>



ORTODONTİDE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI

DergiPark
AKADEMİK

Ömer Faruk SARI¹, Muhammed Hilmi BÜYÜKÇAVUŞ²

ÖZ

Kompleks yapılı cisimlerin kuvvet gibi dış etkenlere karşı oluşturdukları tepkilerin bütün olarak incelenebilmesi için, oluşturulan denklemlerin geleneksel matematiksel analitik yöntemlerle çözmek zor ve karmaşık olduğundan, bu tip incelemelerde sonlu elemanlar analizi gibi yöntemlerle ara değerler elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile cismin tamamının değerlendirilmesi yerine, cismi daha küçük ve değerlendirmesi daha kolay olan sonlu elemanlara ayırarak, uygulanan etkinin her bir sonlu elemanda ve sonlu elemanların birbirleri arasında oluşturduğu etkileri incelenir. Bu yöntem ağız içi mekaniğinin ve uygulanan sabit ve fonksiyonel apareyler ve etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak daha başarılı ortodontik tedaviler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi hakkında genel bir görüş ve ortodonti bilimindeki kullanım alanlarıyla ilgili bilgi ve bakış açısı kazandırmak istenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, gerilim, gerinim, ortodonti

¹ Arş. Gör., Süleyman Demirel Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Ortodonti Ana Bilim Dalı, ORCID: 0000-0003-4087-571X

² Dr. Öğr. Üyesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Ortodonti Ana Bilim Dalı, mhbuyukcvs@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2184-1549

Makale Geliş Tarihi: 25.08.2020 - Makale Kabul Tarihi: 07.10.2020
DOI: 10.17932/IAU.DENTAL.2015.009/dental_v07i1003

FINITE ELEMENT ANALYSIS APPLICATIONS IN ORTHODONTICS

ABSTRACT

In order to examine the reactions of complex bodies against external factors such as force, it is difficult and complex to solve the created equations with traditional mathematical analytical methods, so intermediate values can be obtained by methods such as finite element analysis in such investigations. Instead of evaluating the whole object with finite element analysis, by dividing the object into finite elements that are smaller and easier to evaluate, the effects of the applied effect on each finite element and between finite elements are examined. This method enables more successful orthodontic treatments by providing a better understanding of the intraoral mechanics and the fixed and functional appliances applied and their effects. In this study, it is aimed to gain a general view about finite element analysis and to gain information and perspective about its usage areas in orthodontics.

Keywords: *Finite element analysis, stress, strain, orthodontics*

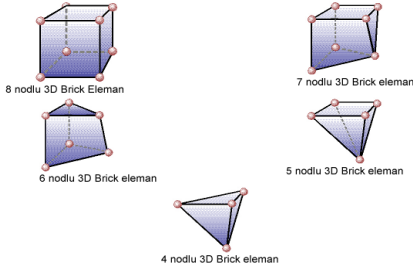
GİRİŞ

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık geometrik yapıların çözümlenmesinde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Yapı burada bir, iki, üç boyutlu olarak incelenmektedir. Değişik şekillerdeki yapılar üzerinde modeller yapılır ve bunlar birbirlerine düğüm noktalarından bileşen basit geometrik elemanlara bölünür (Şekil 1). Geometrik yapıların her birinde kuvvet dağılımının farklı olmasından dolayı doğru bir analiz için eleman sayısı çoğaltılmaktadır.

Genel olarak çekme, sıkışma ve kesme olmak üzere 3 tip gerilme kuvveti vardır:

- Çekme gerilmesi (tensile stress), cismin moleküllerini birbirinden ayrılmaya zorlayan, aynı doğrultuda ve ters yönde iki kuvvetin cismi etkilemesiyle oluşur.
- Sıkışma gerilmesi (compressive stress), cismin moleküllerini birbirine yaklaştırmaya zorlayan, aynı doğrultuda ve ters yönde iki kuvvetin cismi etkilemesi ile oluşur.
- Kesme gerilmesi (shear stress), cismin moleküllerini birbiri üzerinde yüzeye paralel yönde kaymaya

zorlayan farklı seviyelerde ve zıt yöndeki iki kuvvetin cisimi aynı anda etkilemesi ile oluşur (1)



Şekil 1: Farklı geometrilere sahip eleman örnekleri (Uysal ve ark.)(2).

Sonlu elemanlar analizi ile ilgili ilk çalışmalar, Hrennikoff ve Mc Henry tarafından geliştirilmiştir. Yöntemin üç boyutlu olarak uygulanması 1964 yılında gerçekleşmiş, 1965 yılında yöntem ile Poisson denklemi çözülmüştür. 1970' de ise yöntem akışkanlar mekaniğine uygulanmıştır. (3,4).

Sonlu Elemanlar Modelinin (SEM) Oluşturulması

Sonlu elemanlar analiziyle incelenecek materyal ilk olarak kendisini oluşturan şekilli elemanlara bölünür. Bu parçaların birleştirilmesi ile incelenecek cismin, dijital benzeri olan sonlu elemanlar modeli (SEM) elde edilir. SEM ile incelenecek yapının tüm detayları üç boyutlu olarak dijital ortama aktarılmış olur. SEM 'de karmaşık olan yapılar daha basit geometrik yapılara dönüştürülür. Bu

şekilde yapılacak olan matematiksel hesaplamalar ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesi amaçlanır (5,6). SEM oluşturulurken birtakım noktalara dikkat edilir. Bunlar:

1. Materyalin yapısal özellikleri: Materyalin dijital ortama orijinaline en yakın şekilde aktarılabilmesi için, materyalin kendine ait özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Materyalin sertliği, yoğunluğu, elastisitesi gibi yapısal özellikleri de analizin yapılacağı programa girilmelidir.

2. Dizayn: Yapılan analizden gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için, oluşturulan üç boyutlu (3D) modelin, incelenen materyali olabildiğince iyi bir şekilde taklit etmesi gerekir. Canlı ve cansız dokularda modelleme, çalışılan dokunun BT görüntülemesi yapılırken aynı zamanda DICOM (The Digital Imaging and Communications in Medicine) programı ile materyalin ağ yapıda SEM oluşturması hassas bir şekilde yapılır (7).

3. Eleman sayısı ve boyutu: İncelenecek materyalin geometrik şeklindeki karmaşıklığın fazlalığına bağlı olarak, bilgisayar ortamında oluşturulan SEM o kadar fazla sayıda sonlu eleman içermelidir. Kullanılacak eleman sayısının hesaplanmasında konusunda uzman mühendislerin tecrübeleri, incelenecek yapının geometrisi ve incelemenin yapılacağı

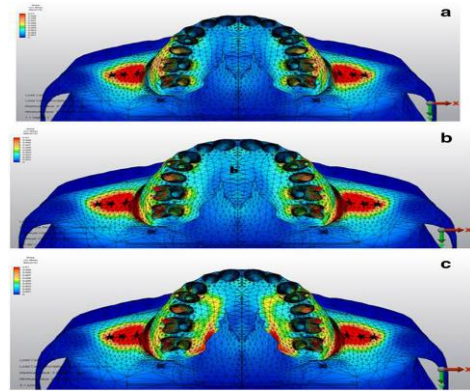
bilgisayarın kapasitesi belirleyici faktörlerdir (8,9). Eleman sayısının artması ile oluşturacak modelin orijinaline yakın olması, bilgisayar programının yapacağı hesaplama sayısının artması demektir (10).

4. Eleman tipi: SEM oluşturulması sırasında çizgisel elemanlar, iki boyutlu katı elemanlar ve üç boyutlu katı elemanlar kullanılır. Materyalin geometrisine uygun eleman tipi seçilmelidir (11). Sonlu elemanlar analizi ile gerinim-gerilme analizlerinin yapılabilmesi için dijital ortama verilmesi gereken bilgiler; materyalin geometrisinin oluşturulmasında kullanılacak koordinatlar, materyalin geometrisine bağlı eleman şekli, elemanların poisson oranı ve elastisite modülü, materyale uygulanan kuvvetler ve incelemesi yapılacak analiz tipidir (12).

Sonlu Elemanlar Analizinin Aşamaları

Sonlu elemanlar analizi hazırlık aşaması, analizin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi olarak üç aşamayı içerir. Hazırlık aşamasında, incelenecek materyalin programlar yardımıyla modelinin oluşturulması ve oluşturulan modelin doğru bir şekilde dijital ortama aktarılması

gerçekleştirilir. Analizin yapılması aşamasında sonlu elemanlar modeli incelemesi yapılır, modeli oluşturan her sonlu elemanın fiziksel özellikleri ve yükleme şartları denkleme dâhil edilir. Ayrıca kullanılan materyali poisson oranı, elastisite modülü vb. değerleri analizin yapılacağı programa girilerek, orijinaline yakın sonuçların elde edilmesi amaçlanır. Sonrasında oluşturulan matematiksel denklem, oluşan yükleme durumları bu aşamada bilgisayar programları ile çözümlenir (13). Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında ise dijital ortamda, farklı veriler ile materyal ile ilgili çeşitli simülasyonlar elde edilebilir. Analiz sonucunda elde edilen veriler renk kodları olarak materyalin istenen açılardan alınan görüntülerine yerleştirilebilir (Şekil 2). Her renk, şeklin altında bir ölçek halinde verilen bir değer aralığını gösterir (8).



Şekil 2: Elde edilen analiz değerlerinin renk kodları ile görselleştirilmesi (Uysal ve ark.)(14).

Sonlu Elemanlar Analizi Avantaj ve Dezavantajları

Sonlu elemanlar analizinin avantajları şunlardır;

1. Karmaşık geometriye sahip cisimler bu yöntemle dijital ortamda gerçeğine çok yakın şekilde taklit edilebilir.
2. Materyal üzerine uygulanan dış etkiler ile içyapısında oluşacak değişimler ve stres dağılımları detaylı şekilde gözlenebilir.
3. Farklı materyallerden oluşan sistemlerin bir bütün halinde incelenebilmesine olanak verir. Dijital ortama aktarılabilen her türlü materyalin analizi yapılabilir.
4. Farklı katmanlardan oluşan cisimlerin, kendisini oluşturan katmanların fiziksel özellikleri ve katmanların birbirleri arasında birleşim özelliklerini yansıtacak bir bütün halinde değerlendirilmesine olanak verir.
5. Dijital ortamda, analiz istenilen sayıda tekrarlanabilir.
6. Analiz sonucu elde edilen veriler, görsel öğeler ile desteklenerek daha anlaşılabilir hale getirilebilir.
7. Cerrahi öncesi planlamaya yardımcı olarak modelleme gereksinimini ortadan kaldırarak maliyeti düşürür.

9. Hızlı ve etkili bir yöntemdir, zamandan tasarruf sağlar (10).

Bunların yanında programların kullanılabilmesi için önemli düzeyde bir teknolojiye ihtiyaç duyulması ve bazı durumlarda incelemelerin zaman alması bu yöntemin dezavantajlarından. Objelerin dijital ortama birebir aktarılması işlemi, kullanılan bilgisayarın donanımı ve analizin yapıldığı paket programların kapasiteleri ile sınırlıdır. Verilerin yetersiz olması ve gerçeğine yakın elde edilemeyen modeller, hatalı sonuçlar çıkmasına sebep olmaktadır (9). Ayrıca sonlu elemanlar analizinde modeller biyolojik yapıları tamamıyla taklit etmediği için, kemik yapıdaki gerilme miktarına bağlı apozisyon veya rezorbsiyon gibi biyolojik değişimler incelenemez (15).

Sonlu Elemanlar Yönteminin Ortodontide Kullanımı

Sonlu elemanlar yöntemi, biomateryallerin ve insan dokularının in vivo olarak ölçülmesi çok güç olan mekanik davranışlarının tespit edilmesinde de oldukça kullanışlı bir araç olması sebebiyle zamanla sağlık alanında da kullanımı gündeme gelmiştir. Yöntem, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak uygulanabilir. İki boyutlu sonlu elemanlar analizi

uygulama kolaylığı nedeni ile tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar analizi mühendislik biliminin yanında diş hekimliğinde de oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Diş hekimliğinin birçok dalında kullanılabilen bu yöntem ortodonti alanında da çeşitli analizlerin yapılmasında kullanılmaktadır. Bu analizlerden bazıları, fonksiyonel apareylerin üst ve alt çeneye olan etkileri, mini vida ve mini implantlarla yapılan tedavilerin çevre dokuda meydana getirdiği etkiler, sabit mekaniklerle dişlerde ve çevre yapılar da oluşan etkilerin incelenmesidir.

Mini Vida ve Mini İmplantların İncelenmesi

Ortodonti pratiğinde çokça kullanılan mini vida ve implantlar molarların dikleştirilmesinde, açık kapanış tedavilerinde arka bölge dişlerin zigoma ankrajıyla intrüzyonunda vb. yer almıştır. Bu tedavilerin sonlu elemanlar analiziyle ilgili de çalışmaları yapılmıştır.

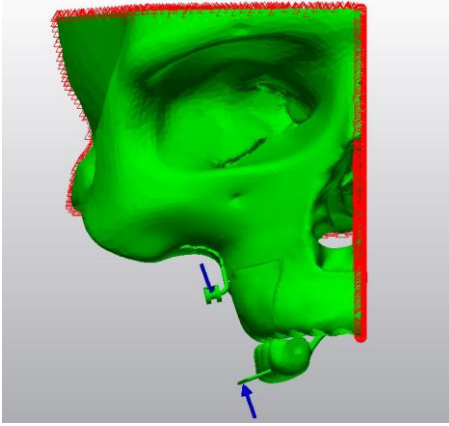
Foto elastik gerilim analizi ile yapılan bir çalışmada, mandibular ikinci moların farklı yöntemler ile dikleştirilmesinin ikinci molar kökleri çevresindeki kemikte stres dağılımları karşılaştırılmıştır (16).

Kojima ve ark. (17) meziale eğimli mandibular ikinci moların yardımcı dikleştirici spring ile dikleştirilmesinin etkilerini sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir.

Gallas ve ark. (18), sonlu elemanlar analizi ile mandibular kemikte immedat yüklenen ve tamamen osteointegre dental implantların ortodontik kuvvetler karşısında stres dağılımlarını incelemiştir.

Acar ve ark. SEM ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında, vestibül taraftan intrüziv kuvvet uygulayarak açık kapanışı tedavi etmeye çalışmışlardır (19).

Başka bir çalışmada kortikotomi destekli zigoma ankrajıyla maksiller posterior intrüzyonun etkileri sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir (Şekil 3) (20).



Şekil 3. Model üzerinde karşılıklı kuvvet uygulama noktalarının görüntüsü (Uysal ve ark.)(2).

Sabit Mekaniklerin Etkilerinin İncelenmesi

Ortodontik tedavinin vazgeçilmez yöntemlerinden biri olan sabit tedaviler kendi içinde birçok mekanik ve etki barındırmaktadır. Bu mekaniklerin meydana getirdiği etkiler de yine sonlu elemanlar analiziyle incelenebilmektedir.

Sabit ortodontik apareylerdeki malzeme değişiminin biyomekanik ve biyokimyasal etkileriyle ilgili yapılan sonlu elemanlar analizi çalışmasında ark teli, braket ve adeziv materyalinin periodontal ligamette değişken davranışlar oluşturduğu görülmüştür (21).

Sardarian ve ark. dikey braket konumlandırmanın tork üzerindeki etkisi ve periodontal ligamette ortaya

çıkan stresi sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir (22).

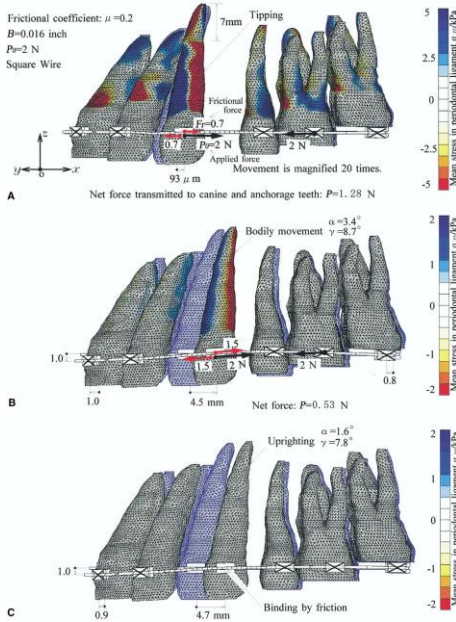
Anterior segment retraksiyonu sırasında ark tellerinin setliği ve sürtünmesine bağlı posterior bölge yer değişiminin incelendiği sonlu elemanlar analizi çalışmasında hem ön hem arka bölgede geriye doğru rotasyon bulunmuştur (23).

McGuinness ve ark. (24), maksiller kanine ortodontik kuvvet uygulaması sonucu periodontal ligamette 3 boyutta oluşan stresleri sonlu elemanlar analizi ile incelemiş ve kaninlerde saf translasyon hareketinin elde edilmesinin zor olduğunu bildirmişlerdir.

Kojima ve Fukui (25) üst kaninlerin ark teli boyunca distalizasyonu sırasında kaninlerde ve çevre dişlerde meydana gelen hareketleri sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Sonuç olarak kaninlerin önce devrilme daha sonra ise paralel hareket yaptığını, sürtünme ile ortodontik kuvvetlerde %60-80 azalma olduğunu, ark telinin kalınlığının artması ya da daha az kuvvet uygulanması ile kaninlerde meydana gelen devrilme hareketinin azaldığını bildirmişlerdir (Şekil 4).

Ammar ve ark. (26) mini-vida ankraji ile alt kaninin distalizasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Çalışma sonucunda hooklar vasıtasıyla

direnç merkezine yakın ve yatay olarak uygulanan distalizasyon kuvvetinin periodontal alanda daha az stres ve dişte paralele yakın hareket oluşturacağını bildirmişlerdir.



Şekil 4. 3 durumda diş hareketi. A. Başlangıç, B. Kararlı durumda, C. Yüklemez durumda (Kojima ve Fukui) (24).

Fonksiyonel Apeylerin Etkilerinin İncelenmesi

Ortodontik erken dönem tedavilerde kullanılan fonksiyonel apeyler alt ve üst çene, dişler ve çevre dokularda çeşitli etkiler oluşturmaktadır. Bu etkilerin bilinmesi tedaviye başlamayı ve tedavi sonundaki durumun tahmini açısından önemli bir yol göstericidir.

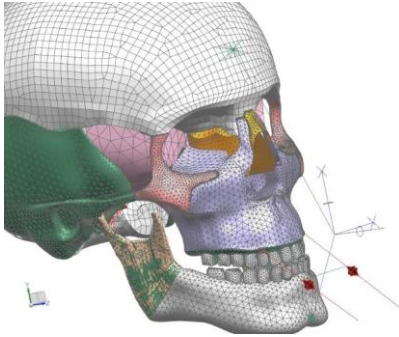
Sonlu elemanlar analizi de bu konuda büyük katkılar sunmaktadır. Bu yöntem konuyla ilgili çalışmalarda da yer bulmuştur.

Maksillaya uygulanan protraksiyon kuvvetinin yönünün kraniyofasiyal komplekste meydana getirdiği etkilere bakılmış nazomaksiller kompleks ve çevre yapılarda yüksek gerilme bulunmuştur (Şekil 5). Aşağı doğru bir protraksiyon kuvveti uygulanmasının en güçlü gerilim dağılımını ürettiği saptanmıştır (27).

Holberg ve ark. headgear ile yapılan ortodontik tedavinin sutural gerilmeye etkisini sonlu analizler yöntemini kullanarak araştırmış ölçülen gerilimin dağılımının uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve yönüyle direkt ilişkili olduğunu bulmuştur (28). Çenelik kullanımının temporomandibular eklemlerdeki meydana getirebileceği etki düşünülerek temporomandibular eklem bağlantısındaki yapıların kuvvette göre gerilim dağılımları incelenmiştir (29).

2014 yılında yapılan bir tez çalışmasında sınıf II malokluzyonların tedavisinde iskeletsel ve dişsel destekli forsus ve monoblok apeyleri kullanılmış ve bunların çene-yüz kemikleri ve TME üzerine etkileri sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Çalışmada kondil boynu, artiküler disk, mandibular

korpus, alt çene ucu ve mandibular kanin dişlerde fizyolojik gerinimler gözlenmiştir, yüz kemikleri ise minimal düzeyde etkilenmiştir (30).



Şekil 5. Diş destekli yüz maskesi kuvvet simülasyonu (Talay B.) (30).

SONUÇ

Ortodontik tedavilerin hemen hemen tümünde (fonksiyonel, sabit vb.) çene, dişler ve çevre dokulara uygulanan kuvvetlerin meydana getirdiği etkiler hem tedavi başlangıcında planlama açısından hem tedavinin seyri açısından hem de tedavi sonunda elde edilmek istenen sonuç ve stabiliteden dolayı oldukça önemlidir. Klinisyenin bu etkileri iyi bilmesi ve tahmin etmesi hastanın ve hekimin avantaj kazanmasını sağlar. Sonlu elemanlar analiz yöntemi bu anlamda büyük bir kolaylık göstermektedir. Hastaya pratik olarak gereksinim duymaması, modelin dijitale aktarılıp simülasyonu gerçeğe yakın olarak gerçekleştirilmesi ve doğru sonuçlar ortaya koyarak apareylerin ve mekaniklerin etkileri

hakkında önemli tahminler vermesi hekimlerin tedavilerinde daha doğru ve başarılı sonuçlar alması açısından çok değerli bir rehber olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Çıkar Çatışması İlişkisi: Yazar, makale ile ilgili çıkar ilişkisi oluşturabilen herhangi bir bağlantı bulunmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Küçük Kurt S. Sonlu elemanlar stres analiz yöntemi ve dental implantoloji alanında yapılan araştırmalar. *Atatürk Üni. Diş Hek. Fak. Derg.* 2017;29(4):701-10.
2. Uysal C. (2016) Üst Çene Posterior Dişlerin Zigoma Ankrajı ile Blok İntrüzyonunda Farklı Kortikotomi Uygulamalarının Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Ankara, Gazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi
3. Hrennikoff A. Solution of problems of elasticity by the framework method. *J appl Mech.* 1941; 8(4): A169-A175.
4. McHenry D. A Lattice Analogy For The Solution of Stress Problems. *J Inst Civ Eng.* 1943;21(2):59-82.

5. Vollmer D, Meyer U, Joos U, Vegh A, Piffko J. Experimental and finite element study of a human mandible. *J Cranio-Maxillofac Surg.* 2000;28(2):91–6
6. Shyam Sundar S, Nandlal B, Saikrishna D, Mallesh G. Finite Element Analysis: A Maxillofacial Surgeon's Perspective. *J Maxillofac Oral Surg.* 2012;11(2):206–11.
7. Ardary W. Plate and screw fixation in the management of mandible fractures. *Clin Plast Surg.* 1989;16(1):61.
8. Kimura A, Nagasao T, Kaneko T, Tamaki T, Miyamoto J, Nakajima T. Adequate fixation of plates for stability during mandibular reconstruction. *J Cranio-Maxillofacial Surg.* 2006;34(4):193–200.
9. Freitas E, Rahal S, Gioso M, Vulcano L, Shimano A, Da Silva J, et al. Finite element modeling for development and optimization of a bone plate for mandibular fracture in dogs. *J Vet Dent.* 2010;27(4):212–21.
10. Daegling D, Hylander W. Experimental observation, theoretical models, and biomechanical inference in the study of mandibular form. *Am J Phys Anthropol.* 2000;112(4):541–51.
11. Rubin C, Krishnamurthy N, Capilouto E, Yi H. Clinical Science Stress Analysis of the Human Tooth Using a Three-dimensional Finite Element Model. *J Dent Res.* 1983;62(2):82–6.
12. Choi J, Baek S, Choi J. Evaluation of stress distribution in resorbable screw fixation system: three-dimensional finite element analysis of mandibular setback surgery with bilateral sagittal split ramus osteotomy. *J Craniofac Surg.* 2010;21(4):1104–9.
13. Ming-Yih L, Chun-Li L, Wen-Da T, Lun-Jou L. Biomechanical stability analysis of rigid intraoral fixation for bilateral sagittal split osteotomy. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2010;63(3):451–5.
14. Uysal C, Baloş Tuncer B, Tuncer C. Maxillary posterior intrusion with corticotomy-assisted approaches with zygomatic anchorage-a finite element stress analysis. *Prog Orthod.* 2019 Mar 4;20(1):8.
15. Meijer H, Kuiper J, Starmans F, Bosman F. Stress distribution around dental implants: influence of superstructure, length of implants, and height of mandible.

- J Prosthet Dent.* 1992;68(1):96–102.
16. Abrão AF, Domingos RG, de Paiva JB, Laganá DC, Abrão J. Photoelastic analysis of stress distribution in mandibular second molar roots caused by several uprighting mechanics. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2018;153(3):415–21.
 17. Kojima Y, Mizuno T, Fukui H. A numerical simulation of tooth movement produced by molar uprighting spring. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2007;132(5):630–8
 18. Gallas MM, Abeleira MT, Fernández JR, Burguera M. Three-dimensional numerical simulation of dental implants as orthodontic anchorage. *Eur J Orthod* 2005;27(1):12–6
 19. Acar A, Canyurek U, Kocaaga M, Erverdi N. Continuous vs. discontinuous force application and root resorption. *Angle Orthod.* 1999;69(2):159-163.
 20. Spyridon N, Papageorgiou, Keilig L, Hasan I, Jäger A, Bourauel C. Effect of material variation on the biomechanical behaviour of orthodontic fixed appliances: a finite element analysis. *Eur J Orthod* 2016;38(3):300-307
 21. Sardarian A, Shahidi S, Boushehri SG, Geramy A. The effect of vertical bracket positioning on torque and the resultant stress in the periodontal ligament—a finite element study. *Prog Orthod* 2014;15(1):1-10
 22. Park, Choon-Soo, et al. Effect of archwire stiffness and friction on maxillary posterior segment displacement during anterior segment retraction: A three-dimensional finite element analysis. *Korean J Orthod* (2019);49(6):393-403
 23. McGuinness N, Wilson AN, Jones M, Middleton J, Robertson NR. Stresses induced by edgewise appliances in the periodontal ligament—a finite element study. *Angle Orthod* 1992;62:15-22.
 24. Kojima Y, Fukui H. Numerical simulation of canin retraction by sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2005;127:542-551.
 25. Ammar HH, Ngan P, Crout RJ, Mucino VH, Mukdadi OM. Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2011;139:59-71.
 26. Tanne K, Hiraga J, Sakuda M. Effects of directions of maxillary

- protraction forces on biomechanical changes in craniofacial complex. *Eur J Orthod.* 1989;11(4):382-391.
27. Holberg C, Holberg N, Janson IR. Sutural strain in orthopedic headgear therapy: A finite element analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2008; 134:53-9.
28. Chen J, Akyuz U, Xu L, Pidaparti RM. Stress analysis of the human temporomandibular joint. *Med Eng Phys* 1998;20:565-72.
29. Duru FI. (2014) Sınıf II Olguların Tedavisinde Kullanılan İskeletsel ve Dişsel Destekli Forsus ve Monoblok Apareylerinin Çene-Yüz Kemikleri ve TME Üzerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi İle Karşılaştırılması. Doktora Tezi, İstanbul, İstanbul Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi.
30. Talay B. (2016) Üst Çeneye Farklı Tip Yüz Maskeleri ile Farklı Açılarda Uygulanan Protraksiyon Kuvvetlerinin Dentofasiyal Yapılar Üzerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. Doktora Tezi, Sivas, Cumhuriyet Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi.