

HASTAYA ÖZEL MİNİ VİDA KULLANIMINDA OLASILIK ESASLI SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

Fatih MEDETALİBEYOĞLU^{*1}, İrfan KAYMAZ², İlhan Metin DAĞSUYU³

¹ Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kars, Türkiye

² Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Erzurum, Türkiye

³ Osmangazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Eskişehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
Hastaya Özel İmplant Biyomekanik Sonlu Elemanlar Olasılık Esaslı Analiz	Vücudun kayba uğrayan bir kısmını iyileştirmek için kullanılan implantlar, son günlerde medikal tedavi yöntemi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat yapılan tedaviler ve yöntemler çoğunlukla hekimlerin tecrübeleri ve ameliyat sonrası vakalar değerlendirilerek geliştirilmektedir. Hekimlere yardımcı olmak ve ameliyat sonrası istenmeyen etkilerin bertaraf edilmesi amacıyla implantın ve yerleştirildiği bölgenin ameliyat öncesi ve sonrası etkileri günümüzde bilgisayar destekli programlar ile simüle edilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle kemik katman kalınlığının, hasta kemik mekanik özelliklerinin dikkate alınmaması ve tekil kuvvetlerin uygulanmasıyla, bu etkiler bilgisayar ortamında modellenerek implantın etkileri simüle edilmiştir. Bu çalışmada bahsedilen standart yaklaşımların aksine hastanın bilgisayarlı tomografi verilerinden yola çıkılarak birebir modeli elde edilmiştir ve değişen kemik kalınlıklarına bağlı olarak 3 farklı bölgeye mini vida yerleştirilerek en iyi konum için de bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca, seçilen implantın ve kemiğin etki edecek kuvvetler altında davranışı sonlu elemanlar programı yardımıyla belirlenmiştir. Böylece ameliyat sonrası implantın davranışı ile ilgili bilgiler de ameliyat öncesi elde edilmiştir. Vücutta kullanılan implantların özelliği, implantın maruz kaldığı yükler ve kemiğin özelliği gibi parametreler doğaları gereği belirli bir istatistiksel dağılıma sahip rastgele değişkenlerdir. Bu çalışma kapsamında, kemik malzeme özelliği ve yüklemelerdeki varyasyonlar dikkate alınarak gerilme, şekil değiştirme gibi implantın davranışını gösteren sonuçlar rastgele değişkenler olarak elde edilerek değerlendirilmiştir.

USE OF PROBABILISTIC FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR USING PATIENT SPECIFIC MINI SCREW

Keywords	Abstract
Patient-Specific Implant Biomechanics Finite Element Probabilistic Analysis	Implants, which are used to heal any part of a body incurring losses, in recent days is often used as a method of a medical treatment. However, treatments and methods are frequently being developed based on the evaluation of postoperative cases and experience of doctors. Nowadays, in order to assist doctors and to eliminate postoperative adverse effects, preoperative and postoperative effects of implant and implant placed region can be simulated by computer based programs. In many studies, bone layer thickness and mechanical properties of bone are not taken into consideration but in this study these parameters are taken into account for simulating the effects on implant behavior. On the contrary to standard approaches, in this study, identical model is obtained on basis of patients computed tomography data and an assessment was made for best location depending on changing bone thicknesses by inserting mini screw to three different regions. Also the selected implant and behavior of bone under forces was determined using finite element method. So that information concerning behavior of implant after surgery was obtained before surgery. The parameters such as the properties of the implants used in the body, the forces acting on the implants and bone properties do not take a single value, rather they are random variables having a statistical distribution. Therefore, within the scope of this study, the results such as stresses and displacements that indicate the performance of the implant were obtained as random variables by considering the variations of the bone material properties as well as the load acting on the implant.

* İlgili yazar: falibeyoglu@gmail.com

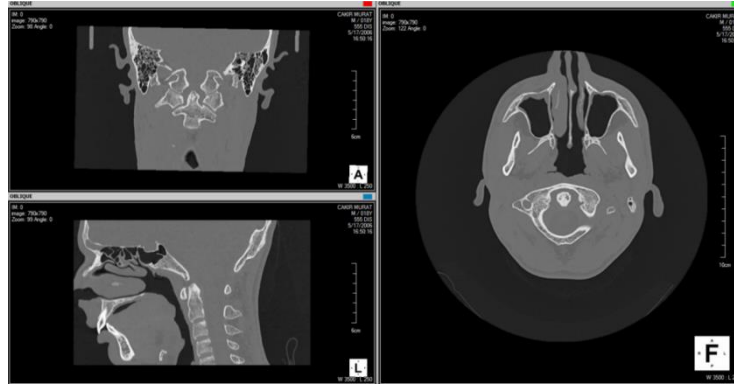
1. Giriş

Mini vidalar kolay uygulanabilen ve üzerilerine kompleks diş hareketlerini sağlayabilecek mekanik kurulabilen kullanışlı aygıtlardır (Önçağ, 2010). Mini vidalar kemikte geçici aparatlar olarak kullanılırlar ve neredeyse ağız içinde her yere yerleştirilebilmesi, hızlı ve atramvatik bir şekilde implantasyonu başlıca avantajlarından (Paik, 2009). Konvansiyonel yöntemlerle elde edilmesi zor olan diş hareketleri mini vidalar yardımıyla etkin bir şekilde kazanılabilmektedir (Önçağ, 2010). Geçen on yılda mini vidaların gelişiminde hızlı bir ilerleme oldu ve ortodontide sıkça kullanılmaya başlandı (Lin vd., 2010). Son çalışmalar enfeksiyondan ziyade biyolojik ve mekanik faktörlerin mini implantların uygulanmasının başarısızlığı ile alakalı olduğunu göstermiştir. Bu faktörler ortodontik kuvvet, implantasyonun yapıldığı bölge, kortikal kemik kalınlığı ve hastanın oral durumuyla ilişkilidir. Mini implantlar geçici ankraj olarak kullanılmasına rağmen, stabilite uzun süreçte implantın başarılı olup olmadığını belirler (Lin vd., 2013). Hastanın kemik mekanik özelliklerini, kuvvetin değişkenliğini, kemiğin fiziksel özelliklerini göz önünde bulundurarak sonlu elemanlar programları ile daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Böylece ameliyat öncesi daha verimli sonuçlara ulaşılabilir.

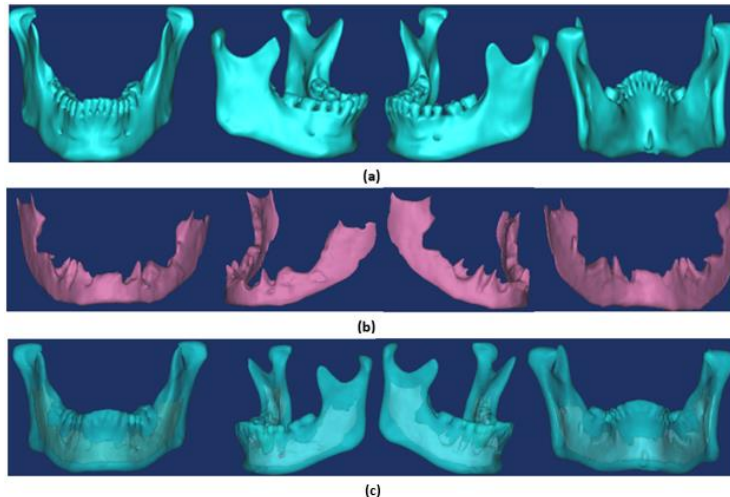
Yukarıda belirtilen şartlar göz önünde bulundurularak; bu çalışmada hastanın mandibular kemik geometrisinin Bilgisayarlı Tomografi verilerinden yola çıkılarak mandibulanın gerçeğe yakın 3B modeli elde edilmiş, benzer olarak yapılan çalışmalara kıyasla sabit kortikal kemik kalınlığı yerine değişken kalınlıklara sahip kortikal kemik modellenmiştir. Mandibula üzerine yapılan çalışmalarda malzeme modelinde ve yüklemeye var olan varyasyonların dikkat alındığı çok az çalışma bulunmaktadır (Petrie ve Williams, 2007). Bu çalışma kapsamında mini vidanın performansını etkileyecek rastgele değişkenler olarak malzeme özelliği ve uygulanan kuvvet dikkate alınmıştır. Böylece bu çalışma, hastaya özel verileri kullanılarak mandibulaya ait sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar esaslı analizlerin olasılık esaslı gerçekleştirilerek implant seçiminde yardımcı olacak şekilde yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmanın materyalini, Şekil 1'de gösterilen benzer bir şikâyetin tedavisi amacıyla Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Ortodonti ABD ve Ağız Diş Çene Cerrahisi ABD kliniklerine başvuran 17 yaşındaki M.Ç. ismindeki bir hastaya ait BT verileri oluşturmaktadır.



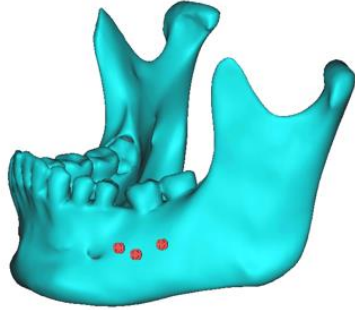
Şekil 1. Alt çene geriliğine sahip hastaya ait BT görüntüleri



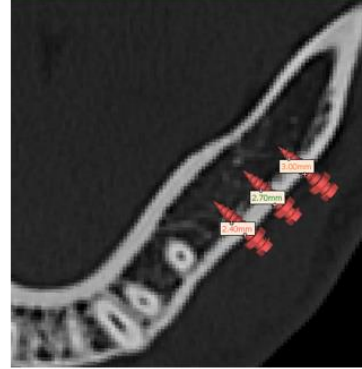
Şekil 2. (a)Kortikal mandibulanın, (b) trabeküler mandibulanın, (c) tüm mandibulanın farklı açılardan görünümü

Hastaya mandibuler gelişim yetersizliği tanısı konulmuş ve tedavi öncesi bilgisayarlı tomografi kayıtlarının alınması öngörülmüştür.

Ayrı ayrı mandibula kemiği için elde edilen kortikal ve trabeküler kemik modeller birleştirilerek gösterilen ve sonlu elemanlar analizi aşamasında kullanılacak modeller elde edilmiştir (Şekil 2).

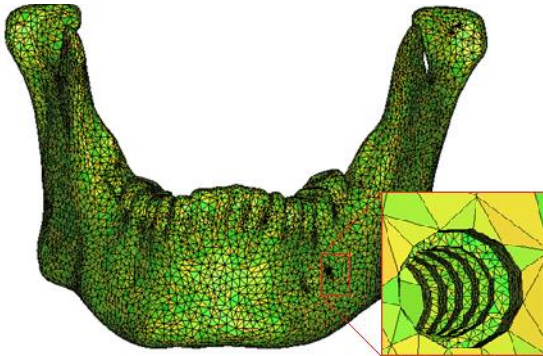


Mini vidalar hekim eşliğinde 3 farklı konumda kemiğe yerleştirilmiş olup, kesim Şekil 3'de gösterildiği gibi yapılmıştır. Kortikal kemik kalınlığının mini vida tutunmasına olan etkisini inceleyebilmek için, Şekil 3 (a)'da gösterildiği gibi 3 farklı pozisyonda (2.40 mm, 2.70 mm ve 3mm) mini vida mandibula kemiğine yerleştirilmiştir. Bu 3 vidanın yerleştirildiği kortikal kalınlıkları Şekil 3(b)'de gösterilmiştir.



(a) (b)
Şekil 3. Farklı konumlarda mini vida yerleştirilmiş mandibulanın gösterimi(a), kesit görünütüsü (b)

Doğruluk oranı yüksek olacak şekilde meshleme yapılmıştır ve mini vidanın gireceği yüzeyler daha detaylı meshlemeye tabii tutulmuştur (Şekil 4).

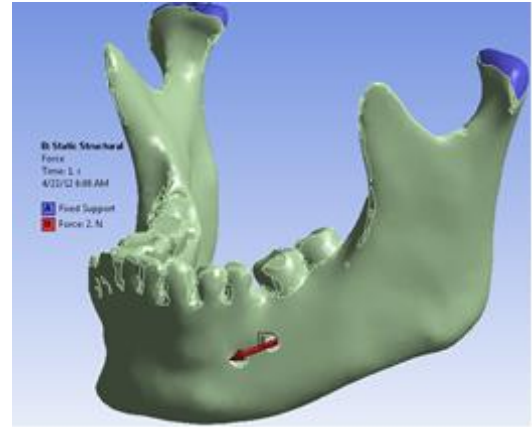


Şekil 4. Mandibulada mini vidanın monte edildiği bölgenin yüzeysel mesh

3. Araştırma Bulguları

Mandibulaya ait sonlu elemanlar modelinde, uygulanan kuvvetin ve malzeme modeli parametrelerindeki varyasyonlar dikkate alınmadan, tek bir değerlerle yapılan deterministik analizlerin yanı sıra bu varyasyonların istatistiksel büyüklükler şeklinde dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen olasılık esaslı sonlu elemanlar analizi sonuçlarına da bu bölümde verilmiştir.

Mandibula Şekil 5'de görüldüğü gibi kondil başlarından sabitlendi ve mini vidaya 2N 'luk kuvvet uygulandı (Gracco vd. 2009).



Şekil 5. Mandibula modelinin sınır şartları

3.1. Mandibulanın deterministik gerilme analizi

Bu çalışma kapsamında, hasta CT görüntülerinden mandibula kemiği 3B olarak elde edilmiş ve sonlu elemanlar esaslı analizlerde kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak izotropik malzeme modeli tanımlanarak sonlu elemanlar esaslı analizlerde etkileri incelenmiştir. Hastaya özel BT görüntülerinden kortikal kemik kalınlığı tespit edilerek farklı konumlarda monte edilmiş mini vidanın etkisi hastaya özel olarak incelenmiş ve elde edilen gerilme ve yer değiştirme analizi sonuçları takip eden bölümde verilmiştir.

3.1.1. Hastaya özel izotropik malzeme modeli

Kemikte ve mini vida uygulanan kuvvet neticesinde meydana gelebilecek yüksek gerilmeler kırılmalara ve travmalara neden olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında mandibula kemiği ve vida meydana gelen gerilmelerin klinik uygulama öncesi belirlenmesi

hedeflenmiştir. Hastaya özel BT görüntülerinden elde edilen ve kortikal ve trabeküler ayrımı yapılmış sonlu elemanlar modeli statik gerilme analizlerinde

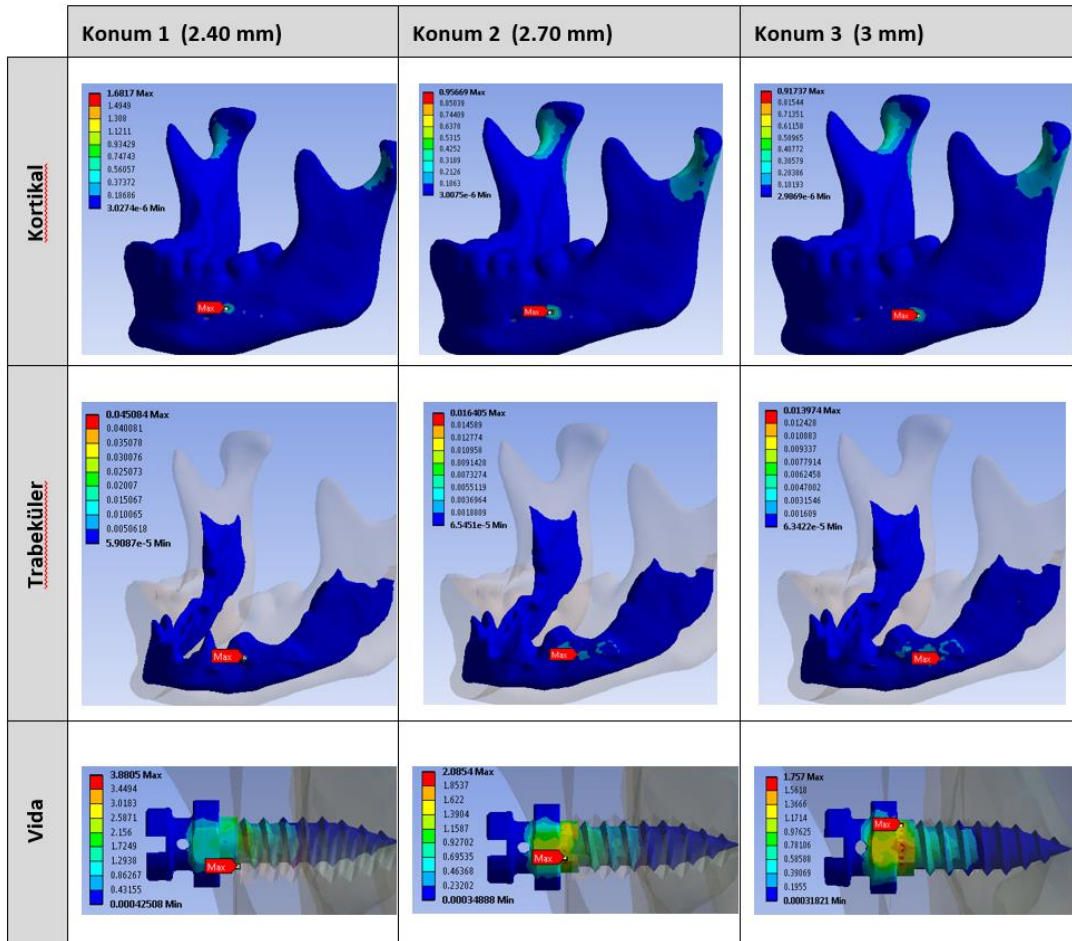
kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak literatürde verilen ve Tablo 1'de gösterilen değerler kullanılmıştır (Motoyoshi vd., 2009a)

Tablo 1. Sonlu elemanlar esaslı analizlerde tanımlanmış olan malzeme özellikleri

Bileşen	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Mandibula Kortikal	14	0.3
Mandibula Trabeküler	0.3	0.3
Mini Vida	110	0.35

Sonlu elemanlar modeli üzerinde statik gerilme analizi gerçekleştirilmiş ve Şekil 5'de uygulanan kuvvet neticesinde mandibula kortikal, trabeküler ve mini vidada meydana gelen von Mises gerilme dağılımları modeller üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6). Verilen sonuçlardan görüleceği gibi mini vidada oluşan en büyük von Mises gerilmeleri vidanın boyun kısmında meydana gelmektedir ve bu sonuç literatürde belirtilen sonuçlar ile uyumludur (Ammar vd., 2011). Meydana gelen gerilmeler, mini vida malzemesinin

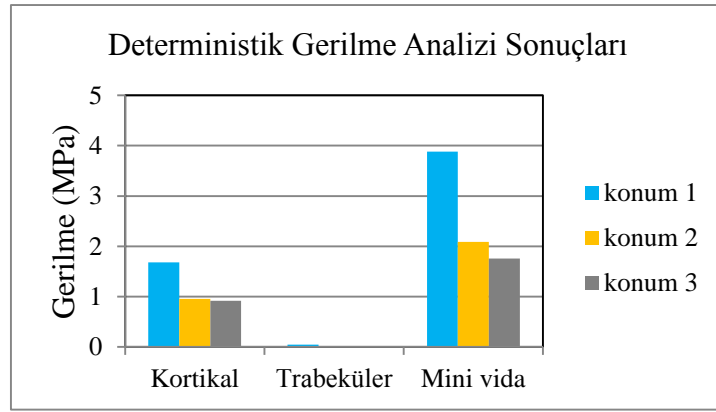
akma gerilmesinin oldukça altında olduğundan vidada herhangi bir hasar durumu meydana gelmeyeceği açıktır. Klinik vakalar incelendiğinde mini vida hasarından ziyade mini vida gevşemesinin hasara yol açtığı bilinmektedir ve yer değiştirme değerlerinin 150 µm aşmaması önerilmiştir (Chong, 2002). Dolayısıyla bu çalışmada mini vida gevşemesine neden olan kortikal ve trabeküler kemikteki gerilme dağılımı dikkate alınarak aşağıda değerlendirilmiştir.



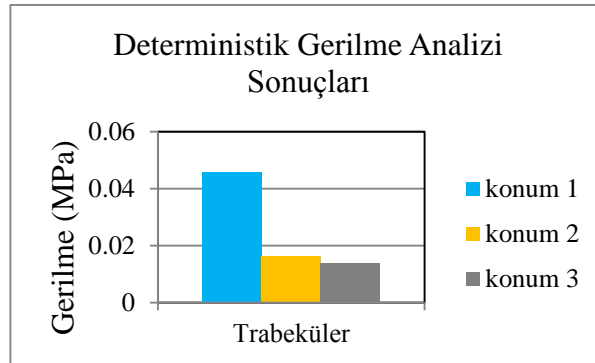
Şekil 6. Mandibula kortikal, trabeküler ve mini vida von Mises gerilmesi dağılımı

Mini vida uygulanmış mandibulada oluşan maksimum von Mises gerilmelerin mini vida konumuna göre karşılaştırılması değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Trabeküler kemikte oluşan gerilme değerleri büyüklükleri küçük olduğunda Şekil 8'de ayrı bir grafikte verilmiştir.



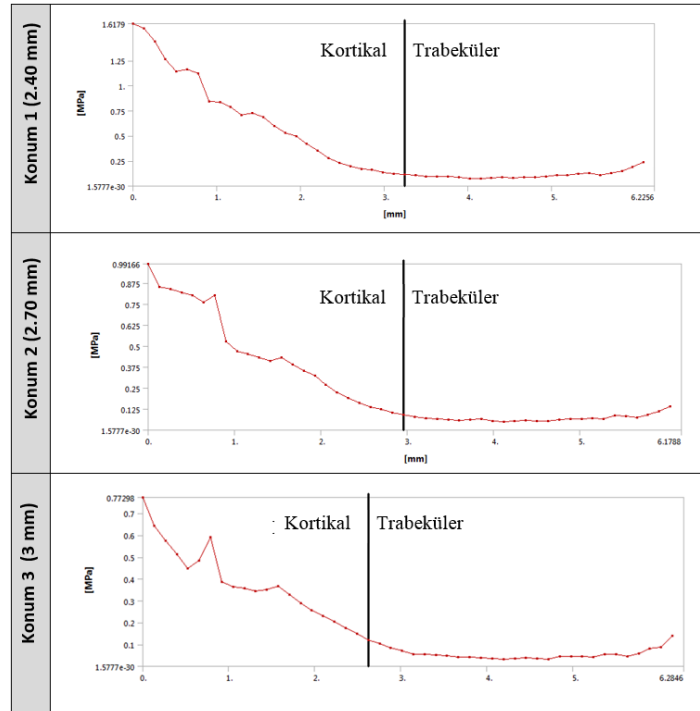
Şekil 7. Mandibula kortikal, trabeküler ve mini vida von Mises gerilmesi dağılımlarının mini vida konumuna göre değerleri



Şekil 8. Mandibula trabeküler kemikte oluşan von Mises gerilmesi mini vida konumuna göre değerleri

Farklı kortikal kalınlıklara sahip bölgelerde ve tüm model dikkate alındığında, mandibula kemiğinin kortikal kısmında gerilme değerinin daha yüksek olduğu ve uygulanan kuvvetin çoğunlukla kortikal bölge tarafından karşılandığı görülmektedir. Benzer

gerilme dağılımı mini vidada gözlemlenmiş ve kortikal kalınlığı arttıkça gerilme değerinin düştüğü görülmüştür. Vida yuvası boyunca hem kortikal hem de trabeküler kemikte gerilme dağılımı ile mini vida boyunca gerilme dağılımı Şekil 9'da verilmiştir.

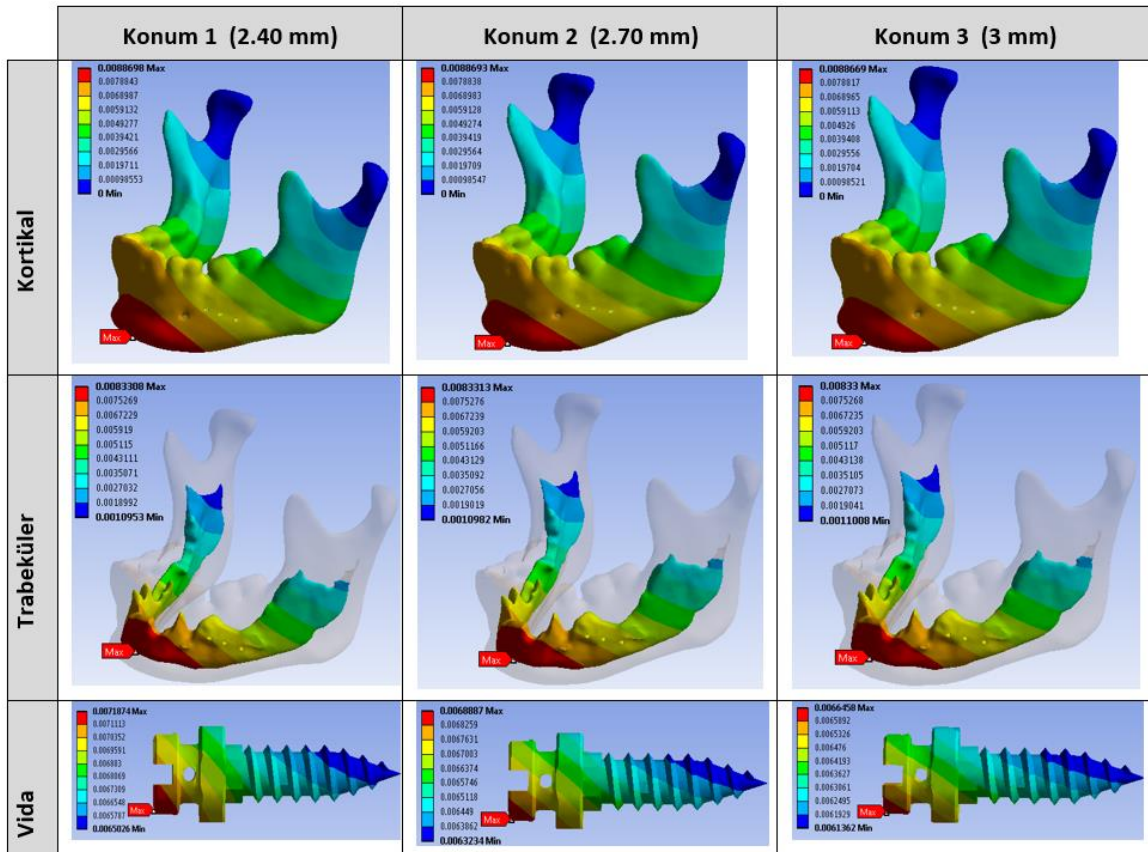


Şekil 9. Mandibula kortikal ve trabeküler kemikte vida yuvası boyunca gerilme dağılımı

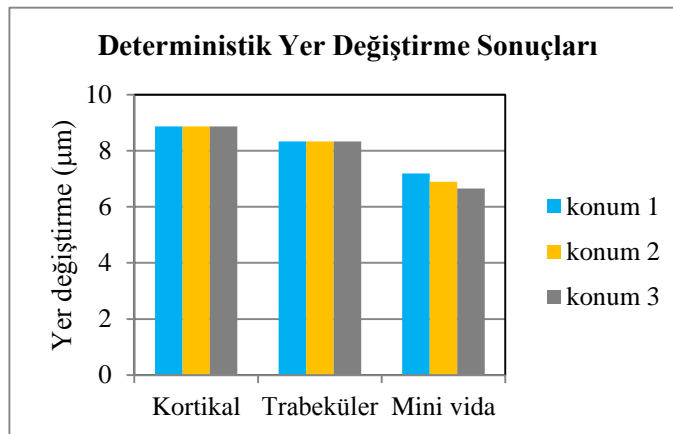
Vida boyunca gerilme dağılımı incelendiğinde kortikal kısımdaki von Mises gerilmelerin beklenildiği gibi trabeküler kısımdan daha yüksektir. Vida dişleri nedeniyle von Mises gerilme değerlerinde artma ve azalma gözlemlenmektedir. Şekil 9'daki gerilme dağılımından elde edilecek en önemli sonuçlardan birisi uygulanan kuvveti çoğunlukla ilk vida dişlerin taşımasıdır. Diğer önemli bir sonuç ise kortikal kalınlığı arttıkça daha az bir gerilmenin trabeküler kısıma karşılık gelen dişlerde olduğu görülmektedir. Mini vidadaki gerilme dağılımına benzer olarak kortikal kısımda vida dişlerinin etkisini de belirtecek şekilde von Mises gerilmelerin yüksek çıktığı görülmektedir. Ancak her üç vida konumunda da

gözlemlendiği gibi gerilme değeri kortikal kısımdan trabeküler kısıma geçildikçe azalmaktadır ve bu literatürde belirtilen sonuçlar ile de uyumludur. Ayrıca kortikal kemik kalınlığı arttıkça uygulanan kuvvet neticesinde oluşan gerilmelerin büyük bir kısmının kortikal kısımda meydana geldiği ve trabeküler kısımda daha az von Mises gerilmeleri olduğu gözlemlenmiştir.

Mini vidanın gevşemesi en çok rastlanılan klinik vakalar olduğundan uygulanan kuvvet neticesinde meydana gelen yer değiştirmeler Şekil 10'da gösterilmiş ve grafiksel olarak Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Mandibula kortikal, trabeküler ve mini vida yer değiştirmeleri



Şekil 11. Mandibula kortikal, trabeküler ve mini vida yer değiştirmelerin mini vida konumuna göre karşılaştırmalı değerleri

Elde edilen bu değerler mikro hareketliliğin limit değeri olan 150µm ile karşılaştırıldığında olduğu gibi düşük olduğu görülmektedir ve mini vida gevşeme hasarının oluşmayacağı söylenebilir. Faklı kortikal kalınlığının sadece mini vidanın yer değiştirmelere etki ettiği Şekil 11’de görülmektedir ve artan kortikal kalınlığı ile mini vidanın yer değiştirme değeri düşmektedir.

3.2. Olasılığa dayalı sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar metodu, performansı yüksek implantlar elde etmek için sıklıkla kullanılmasına rağmen, bu analizlerde dikkate alınan parametreler ve değerler deterministiktir, yani sadece tek bir değer alırlar. Dolayısıyla, implanta gelen yükler, malzeme özellikleri gibi parametreler doğaları gereği deterministik değildirler ve belirsizlikler içermektedirler. Bu belirsizliklerden kaynaklanan etkilerin tasarıma olumsuz yönde etki etmesini engellemek için klasik yaklaşımda emniyet faktörü kullanılır. Ancak bu yaklaşımda kimi tasarımlarda aşırı büyük boyutlara, kimi durumlarda da emniyetsiz tasarımlara yol açmaktadır (Kaymaz ve Sadeler, 2002). Bu nedenle tasarıma etki eden parametrelerdeki bu belirsizlikleri tasarıma ilave edebilmek için; Birinci-Derece Güvenirlik Metodu (First-Order Reliability Method (FORM)) ve İkinci-Derece Güvenirlik Metodu (Second-Order Reliability Method (SORM)) (Ditlevsen and Madsen 1996) gibi nümerik yöntemlerin yanı sıra Monte Carlo, Latin Hypercube Sampling gibi simülasyon yöntemleri geliştirilmiştir.

Tablo 2. Mandibula mini vida analizinde dikkate alınan rastgele değişkenler

Elastisite Modülü (GPa)	Dağılım Tipi	Ortalama	Standart Sapma
Mandibula Kortikal	Lognormal	14	1.4
Mandibula Trabeküler	Lognormal	0.3	0.03
Mini Vida	Lognormal	110	11
Yükleme (N)	Normal	2	0.2

Olasılık esaslı gerilme analizleri mini vidanın üç faklı konumuna göre gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları olarak maksimum yer değiştirme değerlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif yoğunluk fonksiyonları elde edilmiş Şekil 12’de verilmiştir.

Mini vidada oluşan deplasman dağılımı incelendiğinde, kortikal kalınlığının artması ile deplasman değerlerinde azalma görülmektedir. Yani kortikal kalınlığı arttıkaça mikro hareketliliğe yol açacak yer değiştirme değerleri Şekil 12’de verilen olasılık yoğunluk fonksiyonundan belirtilen ortalama değerlerini de azaltmaktadır. Farklı kortikal kalınlıkları için, kortikal, trabeküler ve mini vidada

Vücutta kullanılan implantların malzeme özelliği, implantın maruz kaldığı yükler ve kemiğin özelliği gibi biyomekanik uygulamaların simülasyonunda kullanılan parametreler; doğaları gereği tek bir değer almazlar ancak belirli bir istatistiksel dağılıma sahip rastgele değişkenlerdir. Bu çalışmada mini vidanın performansına etki eden parametrelerdeki varyasyonlar dikkate alınarak olasılık esaslı analizler gerçekleştirilmiş ve takip eden bölümde verilmiştir.

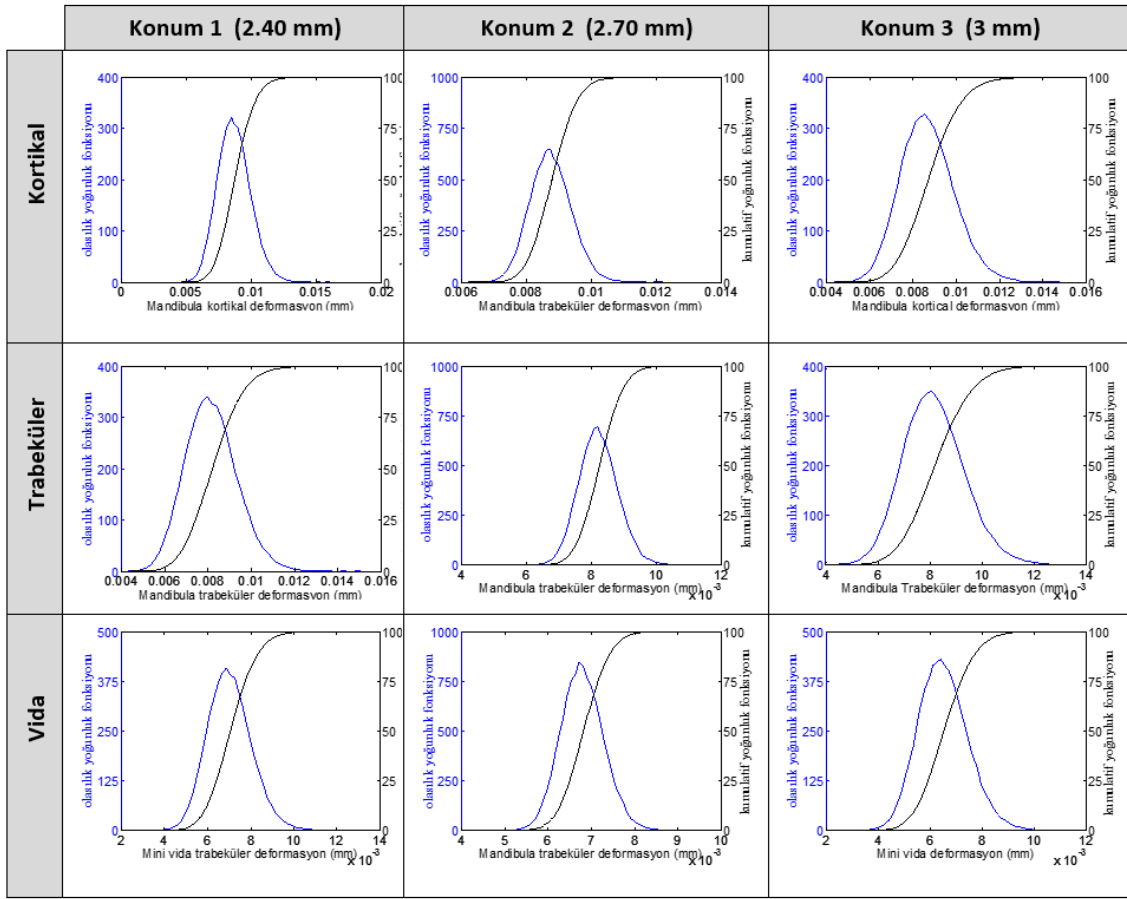
3.2.1. Mandibulanın olasılık esaslı gerilme analizi

Mandibula zerine yapılan çalışmalarda malzeme modelinde ve yüklemede var olan varyasyonların dikkate alındığı çok az çalışma bulunmaktadır (Petrie ve Williams, 2007). Bu alışmalar incelendiğinde, bu çalışma kapsamında mini vidanın performansını etkileyecek rastgele değişkenler olarak malzeme özellikleri ve uygulanan kuvvet dikkate alınmıştır. Bu alışma kapsamında sadece izotropik malzeme özelliği değerleri dikkate alınarak olasılık esaslı gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar takip eden bölümde verilmiştir.

Mandibulaya monte edilmiş mini vidanın olasılık esaslı gerilme analizinde, deterministik gerilme analizinde dikkate alınan izotropik malzeme özelliği değerlerinde %10’luk varyasyonun etkisini incelemek için, rastgele değişkenler ve istatistiksel değerler Tablo 2’de verilmiştir.

oluşan yer değiştirme değerlerinde özellikle konum 1’de yani kortikal kalınlığın en az olduğu durumdaki yer değiştirmelerin diğer mini vida konumlarına göre daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

Mandibula modelinde her üç bileşende (kortikal, trabeküler ve mini vida) meydana gelen yer değiştirme değerlerinin olasılık dağılımlarının lognormal dağılıma yakın olduğu da görülmektedir. Bu durum deterministik analizden elde edilen sonuçlardan farklı olarak, girdi değişkenlerdeki varyasyonların, mini vida davranışının da rastgele bir değişken olduğunu göstermektedir.



Şekil 12. Mandibula kortikal, trabeküler ve mini vida yer değiştirme büyüklüklerinin olasılık ve kümülatif yoğunluk fonksiyonlar

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında, hasta bilgisayar tomografisi verisi yardımıyla implant yerleştirilecek kemiğin üç boyutlu modelinin elde edilmesi suretiyle kullanılacak implantın etki eden kuvvetler altında davranışı olasılık esaslı yöntemler ile incelenmiştir ve örnek uygulama olarak mandibulada mini vida uygulaması seçilmiştir. Böylelikle biyomekanik alanda yapılacak araştırmalarda mutlaka gerçekleştirilmesi gereken disiplinler arası çalışma Atatürk Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Ortodonti ABD ile bu çalışmada ortaya konmuştur.

Mandibuler gelişim yetersizliği şikâyetin tedavisi amacıyla Atatürk Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Ortodonti ABD ve Ağız Dış Çene Cerrahisi ABD kliniklerine başvuran 17 yaşındaki bir hastaya ait BT verileri oluşturmaktadır. Tedavi sürecinde ankraj özellikleri yüksek olan mini vidaların kullanılması hedeflenmiştir.

İmplantın yerleştirileceği kemik modeli, hastaya özel olarak üç boyutlu Bilgisayar Tomografi(BT) verileri kullanılarak MIMICS programı yardımıyla elde edilmiştir. Belirtildiği gibi, BT verilerinden Hounsfield Unit (HU) değerlerine bağlı olarak kemik modelinin elde edilmesinde ilgili hekimin yardımı, modellerin kemiğin geometrik yapısını uygunluğunu sağlamada

da oldukça önemlidir. Bu amaçla mandibula modelinin elde edilmesinde ilgili hekimin yardımıyla HU değerleri seçilmiş ve model değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan çalışmaların önemli başlıkları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Literatürde verilen modellerin aksine, kemik kortikal ve trabeküler ayrımı hasta BT verileri yardımıyla mandibula için hastaya özel olarak modellenmiştir.
- Bu çalışma kapsamında, mini vidanın yerleştirileceği, mekanik açıdan en uygun bölgeyi belirlemek için hasta BT verilerinden kortikal kalınlığını farklı olduğu 3 bölge belirlenmiş ve analizler bu bölgeler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.
- Bu çalışma kapsamında mini vidanın performansına etki eden parametrelerdeki varyasyonlar dikkate alınarak olasılık esaslı analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Literatürde Motoyoshi vd. 2009a farklı kortikal kalınlıklarını (0.5, 0.75, 1, 1.25 ve 1.5

mm) dikkate alarak suni bir model üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ise gerçek bir hastadan alınan mandibula görüntüsünde kortikal kemik kalınlığının farklı olduğu bölgelerde gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve benzer sonuçlar bulunmuştur.

- Mini vida uygulanmış mandibulanın sonlu elemanlar modeli üzerinde statik gerilme analizi gerçekleştirilmiş ve uygulanan kuvvet neticesinde, mandibula kortikal trabeküler ve mini vidada meydana gelen von Mises gerilme dağılımları elde edilmiştir. Verilen sonuçlar incelendiğinde mini vidada oluşan en büyük von Mises gerilmeleri vidanın boyun kısmında meydana gelmektedir ve 4 MPa civarındadır. Bu sonuç literatürde belirtilen sonuçlar ile uyumludur (Ammar vd. 2011). Meydana gelen gerilmeler, mini vida malzemesinin akma gerilmesinin olduğuça altında olduğundan vidada herhangi bir hasar oluşumunun meydana gelmeyeceği açıktır.
- Klinik vakalar incelendiğinde mini vida hasarından ziyade mini vida gevşemesinin hasara yol açtığı bilinmektedir ve yer değiştirme değerlerinin $150\mu\text{m}$ aşmaması önerilmiştir (Chong 2002). Bu çalışmada maksimum yer değiştirme miktarı $10\ \mu\text{m}$ civarında elde edilmiştir.
- Benzer olarak, kimi çalışmalarda gevşemeyi belirlerken dikkate alınan gerilme durumu da araştırılmış ve bu çalışmada mini vida gevşemesine neden olan kortikal ve trabeküler kemikteki gerilme dağılımı dikkate alınmıştır. Oluşan gerilme değerleri kortikal kemik için 1.5 MPa civarında iken bu değerler trabeküler kemik için 0.02 MPa gibi olduğuça düşük değerlerdedir.
- Kortikal kemik kalınlığı arttığuça, hem kortikal kemikte ve hem de trabeküler kemikte von Mises gerilmesi düşmektedir. Dolayısıyla, klinik uygulamalarda en fazla görülen hasar durumu olan gevşemeye yol açacak etken azalmaktadır.
- Mini vidanın yerleştirileceği bölgedeki kortikal kalınlığının çok az bir miktar artması durumunda bile mini vidada oluşan gerilmenin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Mini vida yer değiştirme değerlerinde de azalma olduğu görülmüştür.
- Mandibula modeli üzerinde gerçekleştirilen olasılık esaslı analizlerde, implant performansını gösteren en önemli sonuçlara ait olasılık dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Bu dağılım fonksiyonları dikkate

alındığında, deterministik analiz sonuçları için yukarıda verilen yorumlar sonuçların ortalama değerleri üzerinden yapılmıştır. Ancak olasılık esaslı sonlu elemanlar analizi sonuçlar incelendiğinde, bu ortalama değerlerden farklı değer alma olasılığının sıfırdan farklı olduğu sonuçların kümülatif dağılım fonksiyonlarından görülmektedir. Bu sonuçlar, biyomekanik alanında yapılan analizlerde rastgele değerkenlerin mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

- Bu çalışma kapsamında, mandibula modelindeki rastgele değerkenlerin standart sapma değerleri %10 civarında olacak şekilde dikkate alınmış olmasına rağmen elde edilen gerilme ve yer değiştirme değerlerindeki varyasyonlar önemli ölçüdedir.
- Bu çalışmada önerilen hastaya özel verilerin kullanılması ve sonlu elemanlar esaslı analizlerin olasılık esaslı gerçekleştirilmesi ülkemizde biyomekanik alanında yapılan çalışmalar dikkate alındığında ilk araştırmalardan biri olmuştur. Hastaya özel bir implant tasarımı için vazgeçilmez olan disiplinler arası çalışma için gerekli alt yapı bilgilerinin oluşturulması bu çalışma sonucu ulaşılan en önemli katma değerlerden biridir. Ancak bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalarda karşılaşılan önemli eksikler aşağıda verilmiştir:
- Kemiiğin viskoelastik özellikleri kullanılarak doğrusal olmayan analizler ile implant-kemik etkileşimi gerçek davranışa daha yakın olarak elde edilebilir. Ancak bunun gerçekleştirilebilmesi için deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Olasılık esaslı analizlerin gerçekleştirilebilmesi için rastgele değerken olarak belirlenmiş parametrelere ait istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesi gerekir. Ancak bir rastgele değerkenin olasılık yoğunluk fonksiyonunu ve bu fonksiyonu tanımlayan ortalama, standart sapma gibi büyüklüklerin belirlenmesi için deterministik analizlerin gerek duyduğu verilerden çok fazla sayıda veriye ihtiyaç duyulur ki, bu olasılığu dayalı analizlerin yaygın kullanılması önündeki en önemli engeldir.

Çalışmada yapılan ve yukarıda verilen sonuçlar değerlendirildiğinde bu alanda yapılacak ileri çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir:

- Hastaya özel veriler yardımıyla ilgili kemiğin üç boyutlu modelinin elde edilmesinde mutlaka ilgili hekimin de görüğu alınmalıdır.
- Hastaya özel verilerin kullanılarak implant performansını değerlendirilmesi gittikçe önem kazanmasına rağmen, hasta BT verilerinden 3B model oluğuurma iğuemi, bu amaçla geliğuştirilmiğu yazılımlar olmasına rağmen en fazla zaman alan ve uzmanlık gerektiren alan olarak, hastaya özel implant uygulamalarındaki en önemli sorunlardan birisidir.

Bu çalığuma kapsamında yapılan analizler statik gerilme analizleridir. Ancak, implant yerleğutirilmiğu hastaların aktiviteleri dikkate alındığında, implanta ve kemiklere gelecek yükleme biçimi değiğuken olacağından yorulma analizinin gerçekteştirilmesi daha uygun olacaktır.

Teğuekkür

110M055 proje koduyla neticelendiren bu çalığumaya sunmuğu olduğu maddi imkânlar dolayısı ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Arağutırma Kurumu'na, teğuekkürlerimizi sunarız.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

Ammar, H.H., Ngan, P., Crout, R.J., Mucino, V.H. and Mukdadi, O.M., 2011. Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 139 (1), e59-e71.

Chong, W., 2002. Immediate loading. *Implant Dentistry*, 11 (4), 315-316.

Ditlevsen, O. and Madsen, H.O., 1996. Structural reliability methods, 178. Citeseer.

Easley, S.K., Pal, S., Tomaszewski, P.R., Petrella, A.J., Rullkoetter, P.J. and Laz, P.J., 2007. Finite element-based probabilistic analysis tool for orthopaedic applications. *Computer methods and programs in biomedicine*, 85 (1), 32-40.

Gracco, A., Cirignaco, A., Cozzani, M., Boccaccio, A., Pappalettere, C. and Vitale, G., 2009. Numerical/experimental analysis of the stress field around miniscrews for orthodontic anchorage. *The European Journal of Orthodontics*, 31 (1), 12-20.

Kaymaz, I. and Sadeler, R., 2002. Mühendislik tasarımında olasılığa dayalı tasarım yöntemlerinin

kullanımı. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 4 (4), 248-258.

Lin, C.-L., Yu, J.-H., Liu, H.-L., Lin, C.-H. and Lin, Y.-S., 2010. Evaluation of contributions of orthodontic mini-screw design factors based on FE analysis and the Taguchi method. *Journal of biomechanics*, 43 (11), 2174-2181.

Lin, T.-S., Tsai, F.-D., Chen, C.-Y. and Lin, L.-W., 2013. Factorial analysis of variables affecting bone stress adjacent to the orthodontic anchorage mini-implant with finite element analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 143 (2), 182-189.

Motoyoshi, M., Inaba, M., Ono, A., Ueno, S. and Shimizu, N., 2009a. The effect of cortical bone thickness on the stability of orthodontic mini-implants and on the stress distribution in surrounding bone. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 38 (1), 13-18.

Motoyoshi, M., Ueno, S., Okazaki, K. and Shimizu, N., 2009b. Bone stress for a mini-implant close to the roots of adjacent teeth-3D finite element analysis. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 38 (4), 363-368.

Önçağ, G., 2010. Ortodontide Mini Vida Uygulamalarında Temel Kavramlar. *Ege Üni. Diğu Hek. Fak. Derg.* 31 (2), 61-68.

Paik, C.-H., 2009. Orthodontic miniscrew implant: clinical applications. Elsevier Health Sciences.

Petrie, C.S. and Williams, J.L., 2007. Probabilistic analysis of peri-implant strain predictions as influenced by uncertainties in bone properties and occlusal forces. *Clinical Oral Implants Research*, 18 (5), 611-619.