

ÖZGÜN ARAŞTIRMA

Posterior Mandibular Bölgede Tek Üye İmplant Üstü Sabit Restorasyonların Oluşturduğu Stres Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

An Investigation of Stress Distribution in Single Unit Implant-Supported Fixed Restorations in Posterior Mandibular Region by Finite Element Method

Doç. Dr. Erkut KAHRAMANOĞLU

Marmara Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi,
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, İstanbul
ORCID ID: 0000-0002-2583-6627

Dt. Aslı Meltem ÖZKAN

Serbest Diş Hekimi, İstanbul
ORCID ID: 0009-0001-2109-4232

Prof. Dr. Paşa YAYLA

Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul
ORCID ID: 0000-0002-1787-9475

Geliş tarihi: 29.08.2024

Kabul tarihi: 14.10.2025

doi: 10.5505/yeditepe.2026.83436

Yazışma adresi:

Doç. Dr. Erkut KAHRAMANOĞLU
Adres: Marmara Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi,
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı,
İstanbul Başibüyük Yolu 9/3 Maltepe/İstanbul
Tel: 0 216 777 50 00
E-posta: erkut.kahramanoglu@marmara.edu.tr

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, alt çenede 36 numaralı diş bölgesine uygulanan tek üye implant üstü sabit restorasyonlarda farklı dayanak seçimlerine bağlı olarak implant, dayanak, implant üstü restorasyon ve alveol kemikte oluşan gerilme dağılımlarının karşılaştırılmasıdır.

Gereç ve Yöntem: Alt çene posterior bölgenin, implantın, Ti-Base'in, titanyum dayanağın, zirkonya dayanağın ve implant üstü restorasyonun 3D tarayıcı yardımıyla 3 boyutlu Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modelleri oluşturuldu. Alt çene posterior bölgenin 3 boyutlu modeli, oluşturulan 3 boyutlu modellerin birleştirme işlemleri ve analizler SolidWorks programı kullanılarak yapıldı. Alt çene posterior bölgenin modelinde 36 numaralı diş bölgesine bir adet 4x10 mm kemik seviyesi konik implant (Straumann, Basel, İsviçre) yerleştirildi. İmplantın üzerine zirkonya ve titanyum dayanakların yerleştirildiği iki farklı model oluşturuldu. Dayanakların üzerine implant üstü restorasyon olarak tam seramik kuron tercih edildi. Modellere vertikal ve 45°'lik oblik kuvvetler olmak üzere iki farklı kuvvet diş yüzeyine üniform dağılımlı olarak uygulandı. Bu kuvvetler sonucu implant, Ti-Base, titanyum ve zirkonya dayanaklar, implant üstü restorasyon ve alveol kemikte oluşan gerilme dağılımları karşılaştırıldı. Her bir yükleme durumu ve implant kombinasyonu için ortaya çıkan gerilme sonuçlarından yola çıkılarak en uygun implant konfigürasyonu konusunda değerlendirilmeler yapıldı.

Bulgular: Alt çenede posterior bölgeye uygulanacak tek üyeli implant üstü sabit restorasyonlarda titanyum dayanağın hasara yatkınlık açısından daha dayanıklı olduğu ve alveol kemikte daha az gerilme oluşmasına sebep olduğu görülmüştür.

Sonuç: Yapılan analizler ve karşılaştırmalar sonucunda alt çenede posterior bölgeye uygulanacak tek üyeli implant üstü sabit restorasyonlarda titanyum dayanağın zirkonya dayanak kullanımına göre stres dağılımı açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, dayanak, implant üstü restorasyon, titanyum, zirkonya

ABSTRACT

Aim: The aim of this study is to compare stress distribution in implant, abutment, implant-supported restoration, and alveolar bone due to different abutment choices in single unit implant-supported fixed restorations applied to the region of tooth number 36 in the lower jaw.

Materials and Methods: 3D models of the posterior region of the mandible, implant, Ti-Base, titanium and zirconia abutments and implant-supported fixed restoration were created. The 3D model of the posterior region of the mandible,

assembly operations and analysis were performed in the SolidWorks program. A 4x10 mm bone level conical implant (Straumann, Basel, Switzerland) was placed to the tooth area number 36. Two different models were created where zirconia and titanium abutments were placed. All ceramic crowns were preferred as a choice of restoration material. Vertical and 45o oblique forces were applied to the models separately. The stress distributions in implant, Ti-Base, abutment, restoration, and alveolar bone were compared. Considering each type of loading and implant combinations, the most appropriate choices are discussed and recommended.

Results: When the stress values are compared on the restoration in the model using titanium abutment, it was determined that the highest stress was in the tubercle slopes of the restoration and in areas close to the area where the force was applied. When we compare the stress values on the restoration as a result of vertical loading in the model using zirconium abutment, it was observed that the highest stress was in the fissures of the restoration and on the surfaces where the restoration and zirconium abutment come into contact.

Conclusion: As a result of the analyses and comparisons, it can be reported that titanium abutment is more advantageous in terms of stress distribution compared to zirconia abutment in single-unit implant-supported fixed restorations to be applied to the posterior region of the lower jaw.

Keywords: Finite element analysis, abutment, implant-supported restoration, titanium, zirconia

GİRİŞ

Diş eksikliği; fonasyon, estetik ve fonksiyon gibi günlük hayatı etkileyen birçok probleme sebep olur.¹ Günümüz diş hekimliğinde hedef, fonksiyonun ve estetiğin mümkün olan en uygun maliyet ve en kolay cerrahi teknikle sağlanmasıdır.²

Osseointegrasyon kavramı tanımlandıktan sonra, pek çok farklı dental implant sistemi geliştirilmiştir. Günümüzde, malzeme bilimindeki ilerlemeler sayesinde dental implantlar, diş hekimliğinde önemli bir tedavi alternatifi haline gelmiştir.³

Tek diş eksikliğinde dental implant uygulamaları, son yıllarda oldukça fazla tercih edilen tedavi seçenekleri arasındadır.⁴ İmplant şekilleri, materyalleri ve uygulama tekniklerindeki gelişim; implantın uzun dönem başarısında önemli artışa sebep olmuştur ve yapılan çalışmalarda bu başarının %90'lara ulaştığı bildirilmiştir.⁵

Diş hekimliği uygulamalarında gerçekleştirilen tedavilerin başarı ve başarısızlıklarının temelini, uygulanan kuvvet ve bu kuvvetin etkenleri oluşturmaktadır.⁶ Başarılı tedavilerin

gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla yapılan bilimsel araştırmaların birçoğu dişlere, restorasyonlara veya kemiğe gelen kuvvetlerin etkilerinin incelenmesi üzerine olmuştur.^{6,7}

Canlı bir organizma üzerinde kuvvetlerin gösterilmesi ve incelenmesi oldukça zor, hatta bazen imkansızdır. Bu durumlarda *in-vitro* çalışmaların değeri artmıştır. Bu tip çalışmalarda sık kullanılan yöntemlerden biri sonlu elemanlar analiz yöntemidir.^{8,9} Sonlu elemanlar analiz yöntemi, katı ve sıvıların mekanik sorunlarının çözümü ve yapıların fiziksel analizleri için yarım asırdan fazla süredir kullanılmaktadır.¹⁰ Sonlu elemanlar analiz yöntemi ile bir problemin en küçük parçasından yola çıkarak sorunu çözmek amaçlanmaktadır. Sorunun temeline en küçük modeldeki en küçük parçadan ulaşıldığı için problemin anlaşılmasının kolaylaştırılması ve yapılan analiz bilgisayar ortamında yapıldığı için aynı şartlar altında tekrarlanabilir olması nedeniyle güvenilir sonuçlar elde edilmesi bu yöntemi değerli kılan noktalardandır.^{11,12} Birçok araştırmacı, dental içerikli çalışmalarında sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanmıştır.¹³⁻²⁰

İmplant firmaları, implant ve dayanak modellemeleriyle beraber bunların materyalleri açısından da değişik alternatifler sunmaktadır.^{21,22} Materyal seçilirken, materyalin kullanılacağı ortamdaki mekanik davranışlarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu amaçla, mekanik davranışlar incelenirken sonlu elemanlar analiz yöntemi sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.²³⁻²⁵

Literatürde posterior bölgelere uygulanan, tek diş eksikliğinde kullanılan implant üstü restorasyonların kuvvet dağılımlarıyla alakalı çalışma sayısı az olduğundan bu analizde, alt çene posterior bölgede uygulanan implant üstü restorasyonlarda farklı dayanak materyallerinin kullanımının alveol kemik, dayanak, implant, Ti-Base ve restorasyon üzerindeki gerilmelere etkisi incelenerek klinik koşullara yakın sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçlara yönelik olarak çalışmamız; uygulanan implant üstü restorasyonlarda farklı dayanak tipi kullanımının; alveol kemik, dayanak, implant, Ti-Base ve restorasyon üzerindeki gerilmeler için istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmayacağı sıfır hipotezini (H0) test etmek amacıyla dizayn edilmiştir.

GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmadaki dijital olarak dizayn edilmiş modellerin elde edilmesinde ve sonlu elemanlar analizinde SolidWorks 2018 programı kullanıldı. Alt çene posterior bölge modelinde 36 numaralı diş bölgesine bir adet 4x10 mm kemik seviyesi konik implant (Straumann, Basel, İsviçre) yerleştirildi. İmplantın üzerine zirkonya ve titanyum dayanakların yerleştirildiği iki farklı model oluşturuldu. Dayanakların üzerine implant üstü restorasyon olarak tam seramik kuron tercih edildi. Önce sistemi oluşturan tüm elemanlar

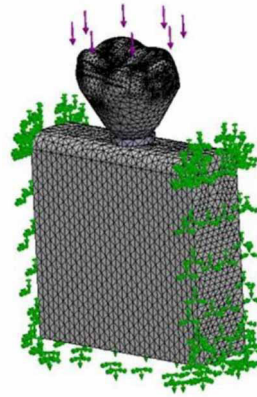
elde edildi. Sonra bu alt elemanlar kullanılarak ve SolidWorks'un sunduğu uygun birleştirme yöntemleri yardımı ile birleştirme işlemleri yapıldı, model bir bütün olarak elde edildi. Malzeme özellikleri, bağlantı noktalarındaki bağlantı özellikleri ve sınır şartları girildikten sonra sonlu sayıda elemanlara bölme (mesh) işlemi yapıldı. Hazırlanan iki ayrı modele vertikal ve 45° oblik kuvvetler olmak üzere okluzal yüzeyden iki farklı kuvvet ayrı ayrı uygulandı. Uygulanan kuvvetler sonucu implant, alveol kemik, Ti-Base, dayanak ve restorasyonda oluşan gerilmelerin sonuçları programda farklı renkler farklı gerilme değerlerini temsil edecek şekilde elde edildi.

Alt çene posterior bölgenin modellenmesi için SolidWorks programında kemiğin kortikal ve trabeküler katmanlarının modelleri ayrı ayrı oluşturuldu. Sonrasında bu iki katman birbirine entegre edildi. İmplant, Ti-Base titanyum dayanak; implant firmasından (Straumann, Basel, İsviçre) temin edildi. 3D tarayıcıda taranarak 3 boyutlu modelleri oluşturuldu. Zirkonya dayanak, CAD programında tasarlanarak kazıma işlemiyle elde edildi. Daha sonra 3D tarayıcıda taranarak 3 boyutlu modeli oluşturuldu. İmplant ve dayanaklar birbirine vidalandı. İmplant üstü kron, yapay plastik dişin (Acrylux) 3D tarayıcıda taranıp 3 boyutlu modelinin elde edilmesiyle oluşturuldu. Tasarlanan alt çene modeli SolidWorks'ta Cavity komutu ile implant için boşluk oluşturuldu. Çenedeki delikler ile implantın yüzeyi seçilerek birleştirme işlemi gerçekleştirildi. Sonrasında implant üstü kron, dayanağa yerleştirildi. Daha güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için eleman boyutları, özellikle analiz için kritik bölgelerde küçük tutuldu. Oluşturulan alt çene modeli, proksimal kesitlerden ve inferior yüzeyinden sabitlendi. Alt çene modelinin, implantların ve diğer yapıların hangi materyalden yapıldığının programa tanıtılması gerektiğinden modelleri oluşturan yapıların her birine fiziksel özelliklerini tanımlayan materyal değerleri (elastiklik modülü, akma mukavemeti ve Poisson oranı) verildi (Tablo 1). İmplant üstü kron restorasyonunda malzeme olarak tam seramikler tercih edildi.

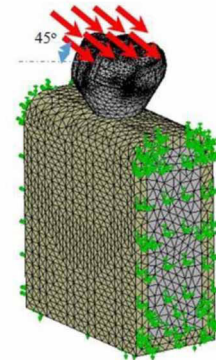
Tablo 1. Analizlerde göz önüne alınan materyallerin mekanik özellikleri

Materyal	Elastik Modülü (GPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Poisson Oranı
Titanyum	110	830	0,35
Kortikal Kemik	13,7	115	0,30
Trabeküler Kemik	7,9	32,4	0,30
Zirkonyum	205	1850	0,30
Tam Seramik	68,9	230	0,28

Siman aralığı göz ardı edildi. Modellerdeki implantların çene kemiğiyle osseointegrasyonunun %100 olduğu kabul edildi. Bu sayede kuvvet uygulanması sırasında kemik ile implant arasında hareket oluşmasına izin verilmedi. Kuvvetler yüzeysel olacak şekilde belirlendi ve dişin üst yüzeyine üniform olacak şekilde merkezine yakın lokalizasyonda tanımlandı. İki farklı senaryoda okluzal kuvvet uygulaması planlandı. Birinci senaryoda dişin okluzal yüzeyine dik olacak şekilde (vertikal yükleme) 100 N'luk kuvvet tüm okluzal yüzeylere üniform bir şekilde uygulandı (Şekil 1). İkinci senaryoda ise yine okluzal yüzeye 45° açıyla tüm okluzal yüzeylere üniform bir şekilde oblik yönde 100 N'luk kuvvet uygulandı (Şekil 2). Kuvvetin yönü vestibülden palatinala olacak şekilde uygulandı.



Şekil 1. Vertikal yükleme



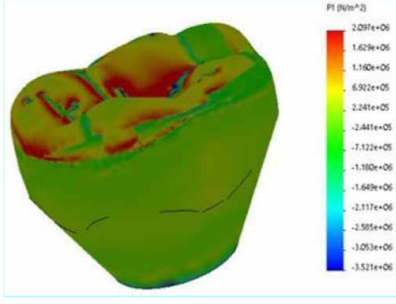
Şekil 2. Oblik yükleme

BULGULAR

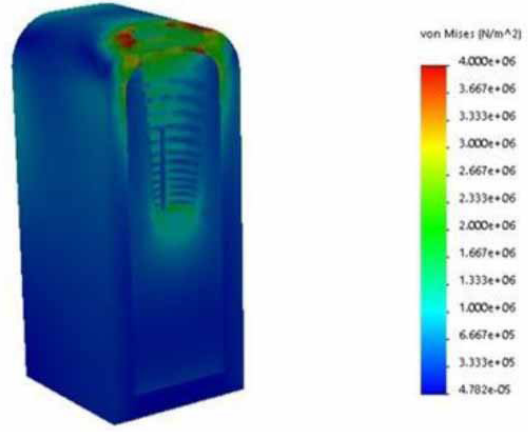
Hazırlanan 2 adet üç boyutlu model üzerinde yapılan analizlerden elde edilen bulgular şekillerle ve renk dağılım skalalarıyla ortaya konuldu. Üç boyutlu modeller üzerinde yapılan Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) sonucunda; implant üstü restorasyon, implant, Ti-Base, alveol kemik ve dayanaklar bünyesinde oluşan von Mises gerilmesi ve maksimum asal gerilmeler hesaplandı.

Titanyum dayanak kullanılan modele uygulanan vertikal yükleme sonucunda;

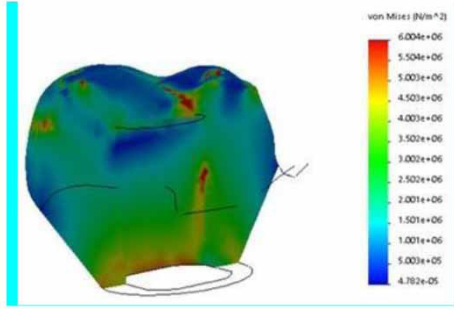
- Restorasyon üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin restorasyonun tüberkül eğimlerinde ve bazı noktalarda da tüberkül tepelerinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise restorasyonun kole bölgesinde ve bazı fissürlerde (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 3. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan maksimum asal gerilmeler



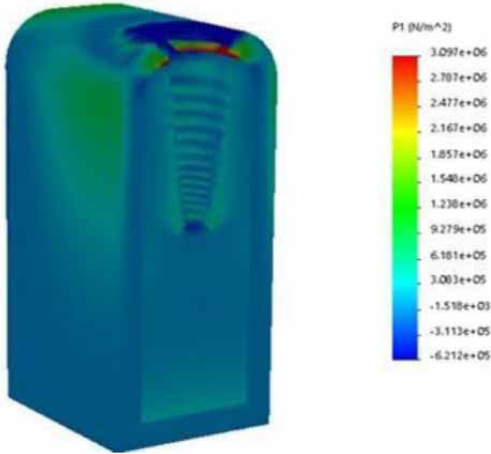
Şekil 6. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan von Mises gerilmeleri



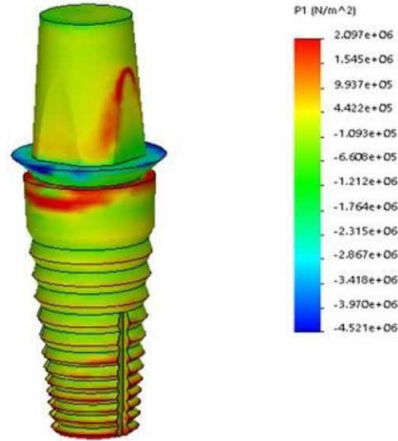
Şekil 4. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan von Mises gerilmeleri

• Alveol kemik üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin dayanak ve implantın birleşim yerinin temas ettiği çevre kemik yüzeyinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise kortikal kemikte ve implantın uç noktasındadır (Şekil 5 ve Şekil 6).

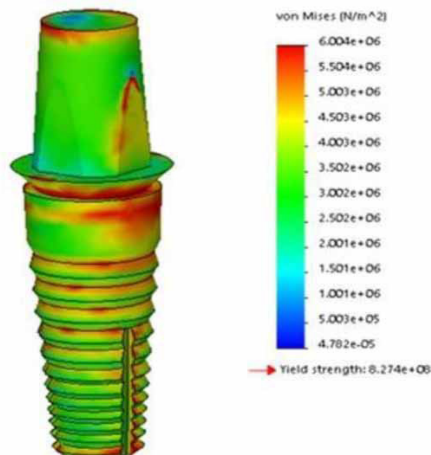
• İmplant ve dayanakta oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin implantın boyun bölgesinde, dayanağın implant üstü restorasyonla temas ettiği bölgelerde ve implantın yivleri arasında olduğu görüldü. İmplantın yivlerinin maruz kaldığı gerilme, implantın boyun bölgesinden uç kısmına gittikçe arttığı gözlemlendi. En düşük gerilme değeri ise dayanağın implant üstü restorasyona oturduğu bölgesindedir (Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 5. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan maksimum asal gerilmeler

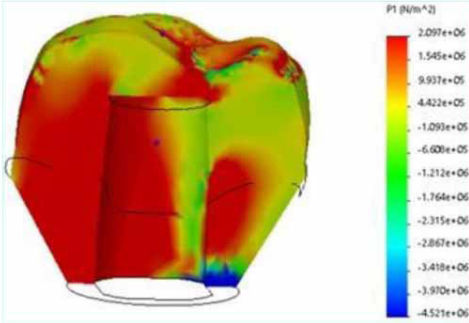


Şekil 7. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant ve abutmentta oluşan maksimum asal gerilmeler

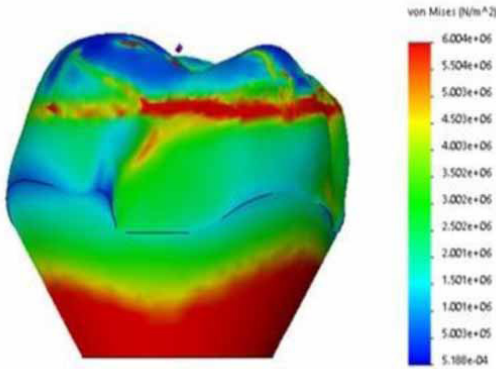


Şekil 8. Titanyum abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant ve abutmentta oluşan Von Mises gerilmeleri

• Restorasyon üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin restorasyonun tüberkül eğimlerinde ve kuvvetin uygulandığı bölgeye yakın yerlerinde olduğu görüldü. Bu gerilmeler bukkolingual yönde azalma göstermektedir. En düşük gerilme değeri ise restorasyonun kole bölgesindedir (Şekil 9 ve Şekil 10).

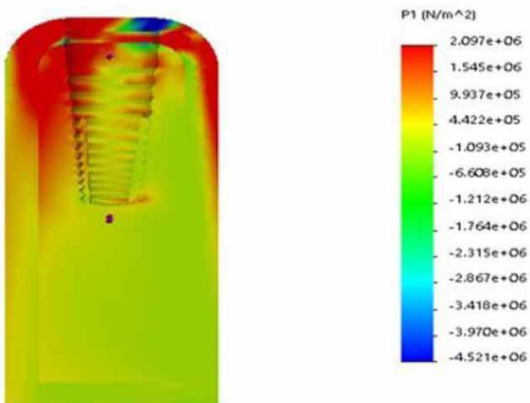


Şekil 9. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan maksimum asal gerilmeler

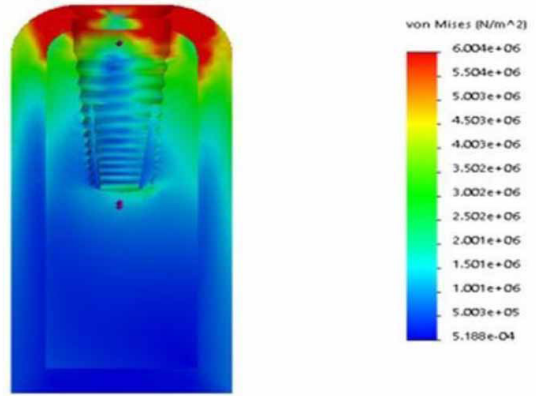


Şekil 10. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan von Mises gerilmeleri

• Alveol kemik üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin implantın boyun bölgesinin çevresindeki kemikte olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise implantın boyun bölgesini çevreleyen kemiğin kuvvet uygulama yönünün tersinde kalan bölgesindedir (Şekil 11 ve Şekil 12).

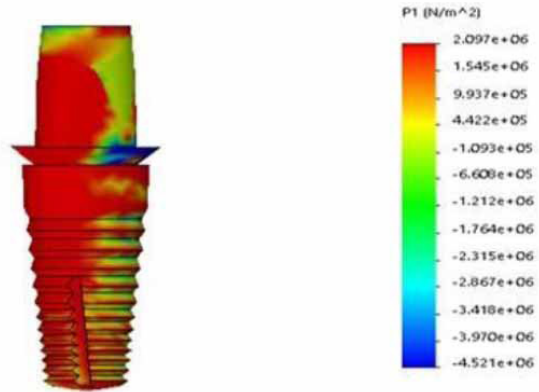


Şekil 11. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan maksimum asal gerilmeler

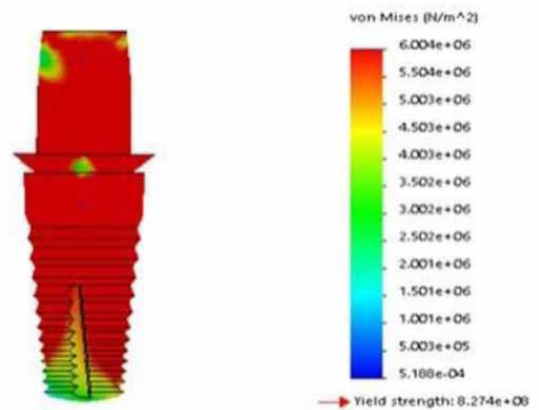


Şekil 12. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan von Mises gerilmeleri

• İmplant ve dayanak üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin dayanak ve implantın kuvvetin uygulandığı yöndeki yüzeylerinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise dayanağın restorasyonun oturduğu bölgesinin kuvvet uygulama yönünün tersinde kalan bölgesindedir (Şekil 13 ve Şekil 14).



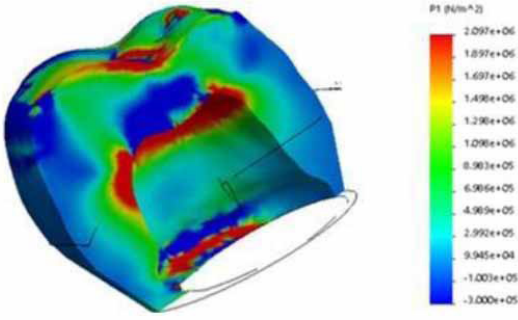
Şekil 13. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant ve abutmentta oluşan maksimum asal gerilmeler



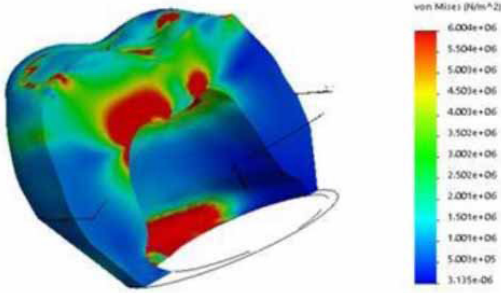
Şekil 14. Titanium abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant ve abutmentta oluşan von Mises gerilmeleri

Zirkonya dayanak kullanılan modele uygulanan vertikal yükleme sonucunda;

• Restorasyon üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin restorasyonun fissürlerinde ve restorasyonla zirkonya dayanağın temas ettiği yüzeylerde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise restorasyonun dış yüzeyindedir (Şekil 15 ve Şekil 16).

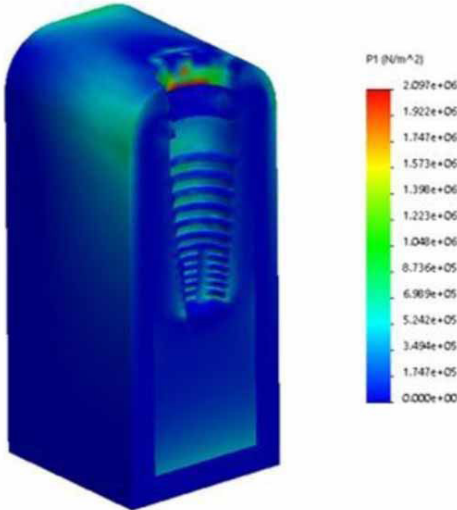


Şekil 15. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan maksimum asal gerilmeler

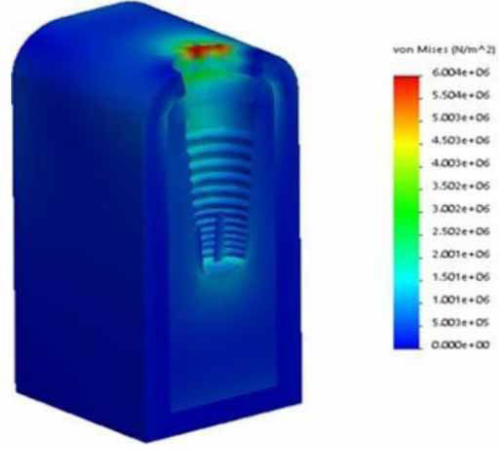


Şekil 16. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan von Mises gerilmeleri

● Alveol kemik üzerinde oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin implantın boyun bölgesinin temas ettiği çevre kemik yüzeyinde olduğunu görüldü. En düşük gerilme değeri ise kortikal kemikte ve implantın uç kısmını çevreleyen kemik yüzeyindedir (Şekil 17 ve Şekil 18).

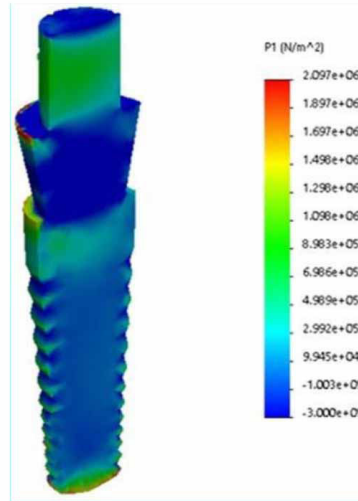


Şekil 17. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan maksimum asal gerilmeler

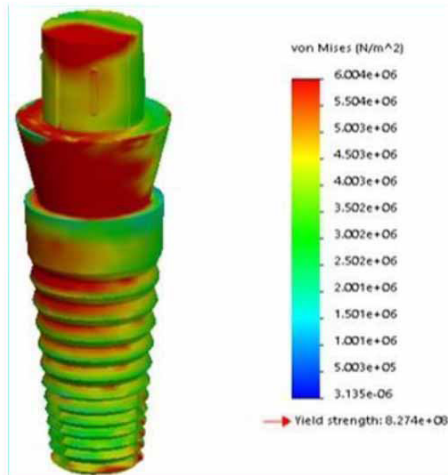


Şekil 18. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan von Mises gerilmeleri

● İmplant ve Ti-Base'de oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin implantın boyun bölgesinde ve implantın apikal uçlu bölgesinde bulunan yivlerde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise Ti-Base'in boyun bölgesindedir (Şekil 19 ve Şekil 20).

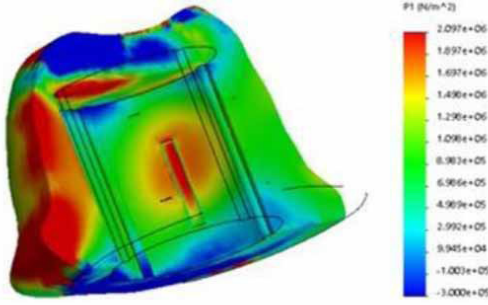


Şekil 19. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant ve Ti-base'de oluşan maksimum asal gerilmeler

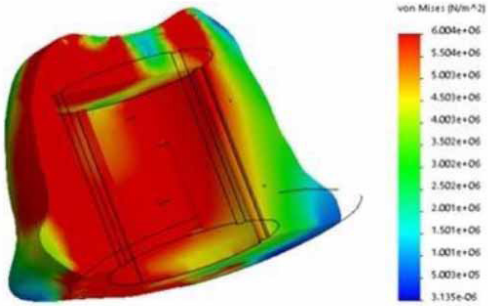


Şekil 20. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu implant ve Ti-base'de oluşan von Mises gerilmeleri

- Zirkonya dayanakta oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin dayanağın orta üçlüsünde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise dayanağın tepesinde ve tabanındadır (Şekil 21 ve Şekil 22).



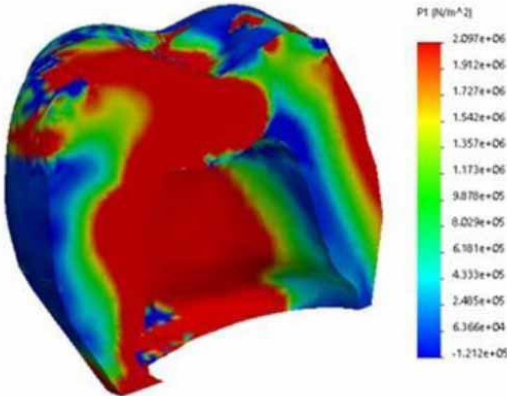
Şekil 21. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu abutmentta oluşan maksimum asal gerilmeler



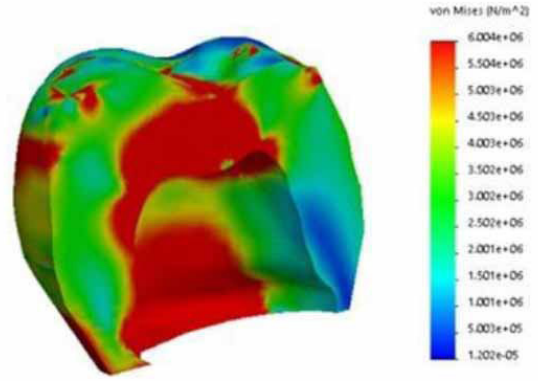
Şekil 22. Zirkonya abutment kullanılan modelde dikey kuvvet sonucu abutmentta oluşan von Mises gerilmeleri

Zirkonya dayanak kullanılan modele uygulanan oblik yüklemeye sonucunda;

- İmplant üstü restorasyonda oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin restorasyonun dayanakla temas ettiği iç yüzeyinde, fissürlerde ve bazı tüberkül eğimlerinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise restorasyonun vestibül yüzeyindedir (Şekil 23 ve Şekil 24).

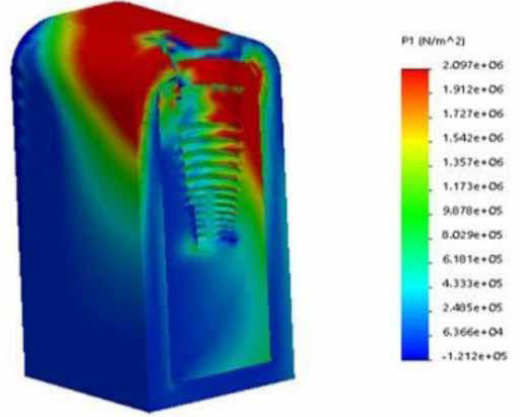


Şekil 23. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan maksimum asal gerilmeler

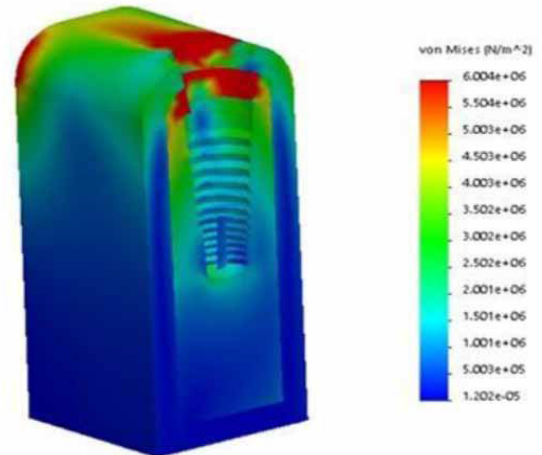


Şekil 24. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant üstü restorasyonda oluşan von Mises gerilmeleri

- Alveol kemikte oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin implantın ve Ti-Base'in boyun kısmını çevreleyen kemik yüzeyinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise implantın uç kısmını çevreleyen kemik yüzeyindedir (Şekil 25 ve Şekil 26).

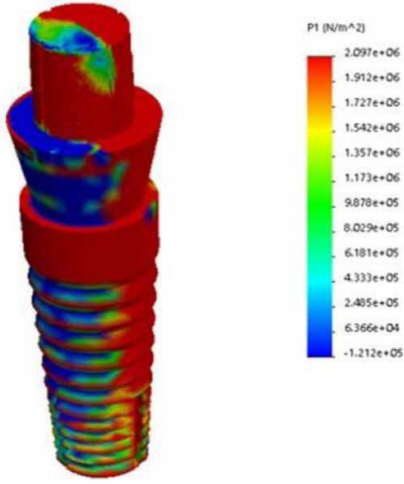


Şekil 25. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan maksimum asal gerilmeler

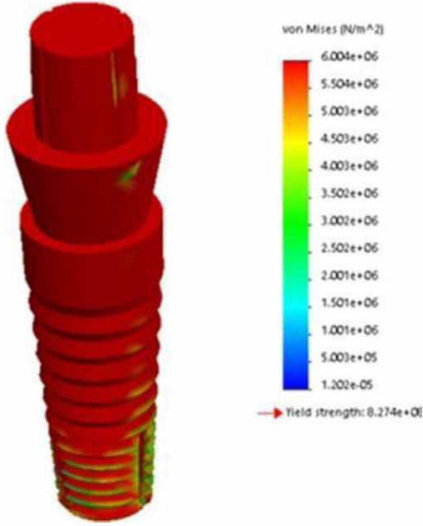


Şekil 26. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu alveol kemikte oluşan von Mises gerilmeleri

- İmplant ve Ti-Base'de oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin kuvvetin uygulandığı taraftaki implant ve Ti-Base yüzeyinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise Ti-Base'in kuvvetin uygulandığı tarafın zıttında kalan yüzeyindedir (Şekil 27 ve Şekil 28).

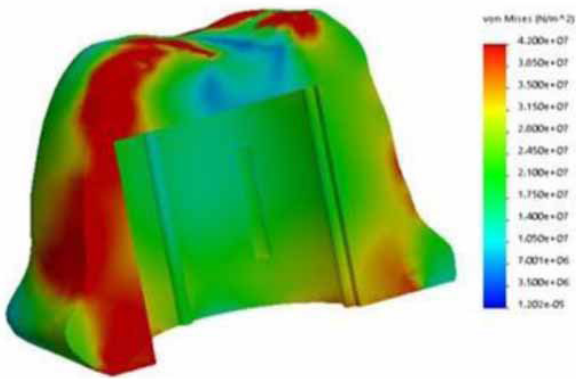


Şekil 27. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant ve Ti-base'de oluşan maksimum asal gerilmeler

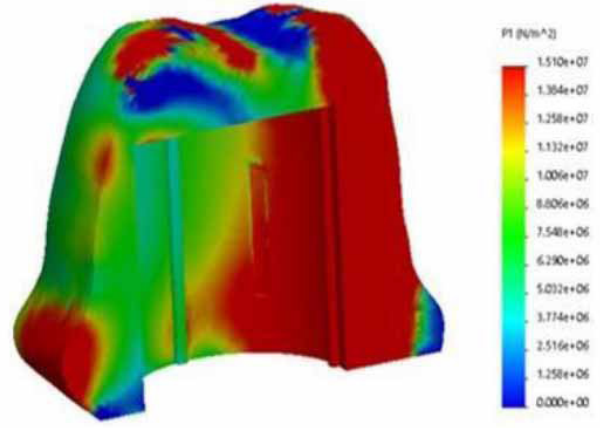


Şekil 28. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu implant ve Ti-base'de oluşan von Mises gerilmeleri

- Zirkonya dayanakta oluşan gerilme değerlerini genel olarak karşılaştırdığımız zaman en yüksek gerilmenin dayanağın kuvvetin uygulandığı taraftaki bölgesinde olduğu görüldü. En düşük gerilme değeri ise dayanağın tepe noktasındadır (Şekil 29 ve Şekil 30).



Şekil 29. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu abutmentta oluşan maksimum asal gerilmeler



Şekil 30. Zirkonya abutment kullanılan modelde oblik kuvvet sonucu abutmentta oluşan von Mises gerilmeleri

TARTIŞMA

Sonlu elemanlar analizinin gerçekliği yansıtabilmesi ve daha hassas sonuçlar elde edilmesi için sınır koşulları, materyal özellikleri, yükleme koşulları belirlenmelidir. Matematiksel modeller üzerinde uygulanacak sadeleştirilmeler dikkatli ve incelenen probleme uygun olarak yapılmalıdır.²⁶

Çalışmamızda elde edilen bulgular göz önüne alındığında implant üstü restorasyonlarda farklı dayanak tipi kullanılmasının; alveol kemik, dayanak, implant, Ti-Base ve restorasyon üzerindeki gerilmeler için istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmayacağı yönündeki sıfır hipotezimiz kısmen reddedildi.

Normal koşullarda, kortikal ve spongiyöz kemik, anizotropik, viskoelastik özellikler gösteren ve homojen olmayan bir yapıya sahiptir. Ancak, sonlu elemanlar analizi çalışmalarında bu yapılar genellikle homojen ve izotropik kabul edilmektedir.²⁷ Çalışmamızda, literatürdeki benzer yöntemlere uygun olarak, kortikal ve spongiyöz kemik, gerçekteki özelliklerin aksine homojen, lineer elastik ve izotropik olarak modellenmiştir.²⁶

Klinik uygulamalarda, kemik-implant yüzeyinde %100 osseointegrasyon gözlemlenirse de sonlu elemanlar stres analizlerinde bu yüzey %100 osseointegre olarak kabul edilmektedir.²⁷ Bu çalışmada da literatüre paralel olarak, kemik-implant yüzeyinde %100 osseointegrasyon olduğu varsayılmış ve analizler bu kabul ile yapılmıştır. Bu sayede kuvvet uygulanması sırasında kemik ile implant arasında hareket oluşmasına izin verilmemiştir. Çalışmamızda zirkonya ve titanyum dayanak kullanılan implant üstü restorasyonlara uygulanan dikey ve 45°'lik oblik kuvvetlerin ayrı ayrı uygulanması sonucu alveol kemik, implant, dayanak, Ti-Base ve implant üstü restorasyonda oluşan gerilmeler karşılaştırıldı. İmplantlar mümkün olduğunca alveol kemiğe 90°'lik açıyla ve alveol kemiğin tam orta bölgesine yerleştirildi. Siman tabakası da göz ardı edildi. Bu çalışmada yapılan analizler, restorasyona uygulanan anlık yüklemelerle yapıldı; tekrarlı yükleme ve

noktasal yükleme uygulandı.

Fanuscu ve ark.¹⁵ yaptıkları bir çalışmada implantı çevreleyen kemikteki stres dağılımını, dikey ve açılı kuvvetler ile kemik kalitesinin gerilme üzerine etkisini araştırmışlar ve açılı yüklemelerin daha önemli gerilme değişikliklerine neden olduğunu bildirmişlerdir. Song ve ark.¹⁸ ileri düzeyde atrofik maksiller molar bölgeye yerleştirilen 2 adet kısa implantın stres dağılımını araştırdıkları çalışmalarında, kısa implantların stres dağılımını kemik seviyesinden ziyade implantın sayısı ve yerleştirme konumları etkilediği bildirmişlerdir. Ayrıca geniş platformlu uzun implant/dayanak kompleksinin en yüksek stres konsantrasyonunu sunarken 2 adet kısa implantın en düşük stres konsantrasyonunu gösterdiğini rapor etmişlerdir. Sevimay²² implant destekli kuron tasarımlarında farklı materyallerin fonksiyonel kuvvetler altında oluşturdukları stres miktar ve lokalizasyonunu incelediği çalışmasında, farklı restoratif materyallerin altyapıda ve implantta stres miktar ve dağılımını önemli ölçüde etkilediğini, destek kemik yapıda ise çalışmada kullanılan materyaller için stres miktar ve lokalizasyonunun farklılık göstermediğini rapor etmiştir. Buna ek olarak, Pereira ve ark.²⁸ yaptıkları sistematik derlemede, zirkonya dayanakların titanyum dayanaklara göre implant bağlantı yüzeyinde daha fazla aşınma gösterdiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada dikey yükleme sonuçları maksimum gerilmeler açısından incelendiğinde, titanyum dayanak kullanılan modelde restorasyonda oluşan maksimum gerilme restorasyonun tüberkül eğimlerinde görülürken, zirkonya dayanak kullanılan modelde daha çok fissürlerde oluşmuştur. Alveol kemikte oluşan gerilmeler incelendiğinde maksimum gerilmelerin olduğu bölgeler açısından titanyum veya zirkonya dayanak kullanımı arasında belirgin bir fark oluşmadı. İmplantta oluşan stresler incelendiğinde titanyum dayanak kullanılan modelde implant boynunda oluşan maksimum stres, zirkonya dayanak kullanılan modelde implant boynunda oluşan maksimum stresten daha fazla bulundu; yani titanyum dayanak kullanılan modelde implant boynu gelen dikey kuvvetler karşısında daha fazla zorlandı. Titanyum dayanak ve Ti-Base üzerinde oluşan gerilmeler incelendiğinde ise titanyum dayanak üzerinde oluşan maksimum stresin genel olarak Ti-Base'de oluşana göre daha fazla olduğu görüldü.

Asal gerilmeler bir cisimde yük altında oluşan normal gerilmelerin maksimum ve minimum değerlerini gösterirken von Mises gerilmesi ise bir cismin zorlanma derecesini gösterir. von Mises değeri arttıkça, cismin hasara olan yatkınlığı artar.²⁶⁻²⁸ Dikey yükleme sonuçları von Mises gerilmeleri açısından incelendiğinde, titanyum dayanak kullanılan modeldeki restorasyonun hasara yatkınlığının, zirkonya dayanak kullanılan modeldeki restorasyonunkinden daha az olduğu görüldü. Aynı şekilde Ti-Base ve titanyum dayanak da karşılaştırıldığı zaman, Ti-Base'in

hasara yatkınlığının titanyum dayanağa göre daha fazla olduğu görüldü.

Oblik yükleme sonuçları maksimum gerilmeler açısından incelendiğinde, titanyum dayanak kullanılan modeldeki restorasyonda oluşan maksimum stresler bölgesel ve sayısal olarak zirkonya dayanak kullanılan modeldekine göre bariz bir farklılık göstermedi. Alveol kemikte oluşan gerilmeler incelendiğinde zirkonya dayanak kullanılan modelin alveol kemiğinde oluşan maksimum gerilmelerin titanyum dayanak kullanılan modelinkine göre daha fazla olduğu görüldü. Zirkonya dayanak kullanılan modelde implant ve Ti-Base'de oluşan maksimum streslerin de titanyum dayanak kullanılan modeldeki implant ve dayanağa göre bölgesel ve sayısal değer olarak daha fazla olduğu görüldü.

Oblik yükleme sonuçları von Mises gerilmeleri açısından incelendiğinde titanyum dayanak kullanılan modeldeki restorasyon ile zirkonya dayanak kullanılan restorasyonun hasara yatkınlıkları açısından belirgin bir farklılık görülmedi. Aynı şekilde zirkonya dayanak kullanılan modeldeki implant ve Ti-Base ile titanyum dayanak kullanılan modeldeki implant ve titanyum dayanak da hasara yatkınlık açısından karşılaştırıldığı zaman belirgin bir farklılık görülmedi.

Dik yüklemede başta implant olmak üzere her bir elemana gelen gerilmeler çevresel olarak önemli oranda üniform olmasına karşın oblik yüklemede bu gerilmeler kuvvetin uygulandığı yönün karşı tarafında daha fazladır ve bu da beklenen bir durumdur.²⁰⁻²⁴

Bir başka açıdan bakacak olursak, zirkonya dayanağın yumuşak geçişli ve keskin olmayan formuna zıt olarak titanyum dayanağın keskin köşeye sahip olması sonucu zirkonya dayanak kullanılan implant üstü sabit restorasyonlarda dayanak ve restorasyonda daha fazla gerilme yığılmaları oluşabilir. Bu durum yorulma kırılması oluşmasını tetikleyebilir. Bu sebeple zirkonya dayanak kullanımının, restorasyonda hasar oluşmasına karşı titanyum dayanağa göre daha avantajlı olduğu düşünülebilir.

İmplant tedavilerinde dayanak seçimi protetik açıdan önemli bir konudur. Materyalin dayanıklılığı yapılan tedavinin uzun dönem başarısını etkileyen faktörlerden biridir. Sonlu eleman analizi çalışmalarının bilimsel kanıt oluşturma açısından *in vivo* ve diğer *in vitro* çalışmalara göre daha alt basamakta yer aldığı unutulmamalıdır. Çalışmamızda elde ettiğimiz veriler klinik pratiğe yönelik önemli fikirler vermektedir. Ancak elde edilen bulguların *in vivo* ve *in vitro* çalışmalara desteklenmesi gerekmektedir.

İmplantın kemiğe %100 osseointegre kabul edilmesi, muakoza direncinin ihmal edilmiş olması, canlı dokulardan farklılık oluşturması ve gerçeği tam olarak yansıtamaması bu çalışmanın limitasyonları olarak kabul edilmiştir.

SONUÇLAR

Bütün bu analizler ve karşılaştırmalar sonucunda alt çenede posterior bölgeye uygulanacak tek üyeli implant üstü sabit restorasyonlarda hasara yatkınlık açısından daha dayanıklı olması ve alveol kemikte daha az gerilme oluşmasına sebep olması nedeniyle titanyum dayanak kullanılmasının zirkonya dayanak kullanılmasına göre daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bu durum vakaya göre değişiklik gösterebilir.

KAYNAKLAR

1. Suca Ç, Suca S. Yapay dişler üzerine çeşitli açılar ile gelen kuvvetlerin destek dokudaki dağılımı. Gazi Üniv Diş Hek Fak Derg 1996; 13(1): 41-44.
2. Horita S, Sugiura T, Yamamoto K, Murakami K, Imai Y et al. Biomechanical analysis of immediately loaded implants according to the "All-on-Four" concept. J Prosthodont Res. 2017 Apr; 61(2):123-132. doi: 10.1016/j.jpor.2016.08.002.
3. Sailer I, Karasan D, Todorovic A, Ligoutsikou M, Pjetursson BE. Prosthetic failures in dental implant therapy. Periodontol 2000. 2022 Feb;88(1):130-144. doi: 10.1111/prd.12416.
4. Ünsal MK, Oruç S. İmplant Destekleri Üzerine Gelen Kuvvetlerin Alt Çene Deformasyonuna Etkisi: Pilot Çalışma. Türkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences. 2000;6(1):7-12
5. Tian K, Chen J, Han L, Yang J, Huang W et al. Angled abutments result in increased or decreased stress on surrounding bone of single-unit dental implants: A finite element analysis. Med Eng Phys 2012; 34(10): 1526-1531. doi: 10.1016/j.medengphy.2012.10.003.
6. Balık A, Karatas MO, Keskin H. Effects of different abutment connection designs on the stress distribution around five different implants: A 3-dimensional finite element analysis. J Oral Imp 2012; 38(1): 491-496. doi:10.1563/AAID-JOI-D-10-00127.
7. Kılınç A, Ataol M, Saruhan N, Gündoğdu M. Maksilla Posterior Bölgede Vertikal Kemik Miktarının Yetersizliği Durumunda Uygulanan Kısa İmplantların Üzerindeki Ve Etrafındaki Kuvvet Dağılımının Sonlu Elemanlar Analizi ile Değerlendirilmesi. Medical Journal of Süleyman Demirel University 2018;25(4):349-55. doi:10.17343/sdutfd.333523
8. Damlar İ, Özyılmaz E, Altan A, Özyılmaz E. Üç boyutlu sonlu eleman analiz yöntemiyle iki ticari implant sisteminin gerilme dağılımlarının incelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2014;2(3):175-80. doi: 10.21923/mbtd.71815.
9. Baiamonte T, Abbate MF, Pizzarello F, Lozada J, James R. The experimental verification of the efficacy of finite element modeling to dental implant systems. The J Oral Implantol 1996; 22(2): 104-110.

10. Akça K, Çehrel MC, İplikçioğlu H. A comparison of three-dimensional finite element stress analysis with in vitro strain gauge measurements on dental implants. Int J Prosthodont 2002; 15(2): 115-121.
11. Ramoğlu S, Ozan O. Diş hekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yöntemi. Atatürk Üniv Diş Hek Fak Derg 2014; 24(3): 701-710.
12. Küçükkurt S. Sonlu elemanlar stres analiz yöntemi ve dental implantoloji alanında yapılan araştırmalar. Atatürk Üniv Diş Hek Fak Derg 2019; 29(4): 701-710.
13. Güler M, Şen S. Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. Ordu Üniv Bil Teknol Derg 2015; 5(1): 56-66.
14. Weinstein AM, Klawitter JJ, Anand SC, Schuessler R. Stress analysis of porous rooted dental implants. J Dent Res 1976; 55(5): 772-777.
15. Fanuscu MI, Vu HV, Poncelet B. Implant biomechanics in grafted sinus: A finite element analysis. J Oral Implantol 2004; 30(2): 59-68. doi:10.1563/0.674.1.
16. Zampelis A, Rangert B, Heijl L. Tilting of splinted implants for improved prosthodontic support: a two-dimensional finite element analysis. J Prosthet Dent 2007; 97(6): 35-43. doi: 10.1016/S0022-3913(07)60006-7.
17. Sannino G. All-on-4 concept: a 3-dimensional finite element analysis. J Oral Implantol 2016; 41(2): 163-171. doi: 10.1563/AAID-JOI-D-12-00312.
18. Song HY, Huh YH, Park CJ, Cho LR. A two-short-implant-supported molar restoration in atrophic posterior maxilla: A finite element analysis. J Adv Prosthodont 2016; 8(4): 304-312. doi: 10.4047/jap.2016.8.4.304.
19. Akça K, İplikçioğlu H. Finite element stress analysis of the effect of short implant usage in place of cantilever extensions in mandibular posterior edentulism. J Oral Rehabil 2002; 29(4): 350-356. doi: 10.1046/j.1365-2842.2002.00872.x.
20. Nesappan T, Ariga P. Comparison of stresses around dental implants placed in normal and fibula reconstructed mandibular models using finite element analysis. J Clin Diagn Res 2014; 8(8): 45-50. doi: 10.7860/JCDR/2014/9147.4764.
21. Wen H, Guo W, Liang R, Xiang L, Long G et al. Finite element analysis of three zygomatic implant techniques for the severely atrophic edentulous maxilla. J Prosthet Dent 2014; 111(3): 203-215. doi: 10.1016/j.prosdent.2013.05.004.
22. Sevimay M. İmplant üstü kron tasarımlarında farklı materyallerin stres dağılımına etkisinin sonlu elemanlar stres analiz yöntemi ile incelenmesi: Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya; 2002.
23. Dere KA. İki Farklı Geometriye Sahip Dental İmplantların Tip 2 Kemikte Oluşturduğu Stres Değerlerinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Değerlendirilmesi: Uzmanlık tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara; 2017.

- 24.** Özyılmaz E. Kısa dental implantlarda implant üstü protetik yapılara etki eden fonksiyonel kuvvetlerin sonlu elemanlar analizi yöntemiyle incelenmesi: Yüksek lisans tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum; 2014.
- 25.** Carvalho MA, Sotto-Maior BS, Cury AADB, Henriques GEP. Effect of platform connection and abutment material on stress distribution in single anterior implant-supported restorations: A nonlinear 3-dimensional finite element analysis J Prosthet Dent 2014; 112(5): 1096-1102. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.03.015.
- 26.** Falcinelli C, Valente F, Vasta M, Traini T. Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. Dent Mater. 2023 Jun;39(6):539-556. doi: 10.1016/j.dental.2023.04.002.
- 27.** Sagat G, Yalcin S, Gultekin BA, Mijiritsky E. Influence of arch shape and implant position on stress distribution around implants supporting fixed full-arch prosthesis in edentulous maxilla. Implant Dent. 2010 Dec;19(6):498-508. doi: 10.1097/ID.0b013e3181fa4267.
- 28.** de Holanda Cavalcanti Pereira AK, de Oliveira Limirio JPJ, Cavalcanti do Egito Vasconcelos B, Pellizzer EP, Dantas de Moraes SL. Mechanical behavior of titanium and zirconia abutments at the implant-abutment interface: a systematic review. J Prosthet Dent. 2022; 28(4): 898-904. doi: 10.5336/dentalsci.2022-89759.