



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

Kortikal Kemik Üzerinde Delme Sürecinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

Investigation of Drilling Process on Cortical Bone Using Finite Element Method

Yazar(lar) (Author(s)): Aysel EREN¹, Mehmet DİRİLMİŞ²

¹ ORCID ID: 0009-0004-9984-1666

² ORCID ID: 0000-0003-2287-8511

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Eren A., Dirilmiş M., “Kortikal Kemik Üzerinde Delme Sürecinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 10(1): 15-25, (2025).

DOI: 10.46578/humder.1614833



Kortikal Kemik Üzerinde Delme Sürecinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

Aysel EREN¹ , Mehmet DİRİLMİŞ^{1*}

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

Öz

Makale Bilgisi

Başvuru: 07/01/2025
Düzeltilme: 14/01/2025
Kabul: 16/01/2025
Yayınlanma: 31/03/2025

Alıntı

Eren A., Dirilmiş M.,
“Kortikal Kemik Üzerinde
Delme Sürecinin Sonlu
Elemanlar Yöntemiyle
İncelenmesi”, Harran
Üniversitesi Mühendislik
Dergisi, 10(1): 15-25,
(2025).

Bu çalışmada, kemik delme işlemi sırasında meydana gelen termal etkiler ve mekanik gerilmeler, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak simüle edilmiştir. Analizlerde, paslanmaz çelikten (4Cr13) üretilmiş matkap ucu ve kortikal kemik modelleri kullanılmıştır. Söz konusu modeller, Autodesk Fusion 360 yazılımında tasarlanmış ve ardından ABAQUS ortamına aktarılmıştır. Simülasyonda ilerleme hızı, dönme hızı ve başlangıç sıcaklığı gibi parametreler tanımlanmış, başlangıç sıcaklığı hem matkap ucu hem de kortikal kemik için 25 °C olarak kabul edilmiştir. Çıktı parametreleri ise sıcaklık ve Von Mises gerilmesi olarak belirlenmiştir. Delme işlemi sırasında ortaya çıkan sıcaklık artışı, biyolojik dokuların bütünlüğünü tehdit edebilir. Özellikle sıcaklığın 47 °C eşliğini aşması durumunda termal nekroz riski ortaya çıkmaktadır. Simülasyon bulguları, delme parametrelerinin sıcaklık ve gerilme dağılımlarına etkilerini ortaya koymuştur. Delme sırasında iş parçasındaki maksimum sıcaklık ve Von Mises gerilmesi sırasıyla 34,73 °C ve 160,8 MPa olarak bulunmuştur. Hava film tabakası ile basit bir soğutma kullanıldığında ise bu değerler sırasıyla 27,32 °C ve 148,1 MPa'dır. Bu tür çalışmalar, kemik yapısı üzerindeki operasyonlarda nekroz bölgesinden uzaklaşarak güvenli kesme parametrelerinin tespiti, bu parametrelerin nekroza etkilerinin simülasyon analizleri ile incelenmesi ve soğutma stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, delme sırasında oluşabilecek termal nekroz riskini en aza indirmek için soğutmanın ve kesme parametrelerinin önemini vurgulamakta ve işlem parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla termal hasar riskinin azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, Paslanmaz çelik (4Cr13), Kortikal kemik

Investigation of Drilling Process on Cortical Bone Using Finite Element Method

Abstract

Article Information

Received: 07/01/2025
Revised: 14/01/2025
Accepted: 16/01/2025
Published: 31/03/2025

Citation

Eren A., Dirilmiş M.,
“Investigation of Drilling
Process on Cortical Bone
Using Finite Element
Method”, Harran
University Journal of
Engineering, 10(1): 15-25,
(2025).

In this study, thermal effects and mechanical stresses occurring during bone drilling were simulated using the Finite Element Method (FEM). Stainless steel (4Cr13) drill bit and cortical bone models were used in the analyses. These models were designed in Autodesk Fusion 360 software and then transferred to ABAQUS environment. In the simulation, parameters such as feed rate, rotational speed and initial temperature were defined, and the initial temperature was accepted as 25 °C for both drill bit and cortical bone. The output parameters were determined as temperature and Von Mises stress. The temperature increase during the drilling process can threaten the integrity of biological tissues. Especially if the temperature exceeds the threshold of 47 °C, the risk of thermal necrosis arises. Simulation results revealed the effects of drilling parameters on temperature and stress distributions. The maximum temperature and Von Mises stress at the workpiece during drilling were found to be 34,73 °C and 160,8 MPa, respectively. When simple cooling with air film layer is used these values are 27,32 °C and 148,1 MPa. Such studies are of great importance in terms of determining safe cutting parameters away from the necrosis zone in operations on bone structure, investigating the effects of these parameters on necrosis by simulation analyses and developing cooling strategies. This study highlights the importance of cooling and cutting parameters to minimize the risk of thermal necrosis during drilling and shows that the risk of thermal damage can be reduced by optimizing process parameters.

Keywords: Finite element analysis, Stainless steel (4Cr13), Cortical bone

*İletişim yazarı, e-mail: mehmet.dirilmis@harran.edu.tr

*Corresponding author, e-mail: mehmet.dirilmis@harran.edu.tr

DOI: 10.46578/humder.1614833

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kemik dokusu, iskelet sisteminin önemli bir yapı taşıdır [1]. Mekanik kuvvetlere karşı direnç gösterebilen ve stres etkilerine uyum sağlayabilen bir yapıdır. Kortikal kemik, bu yapının dış yüzeyini oluşturur ve iskelete mekanik dayanıklılık sağlar [2]. Dış yüzey, ortopedi ve beyin cerrahisinde yapılan ameliyatlarda sıklıkla müdahale edilen bölgedir. Bu işlemler arasında vida yerleştirme, protez sabitleme ve kafatasının delinmesi örnek olarak gösterilebilir [3]. Bu işlemler esnasında, kesme işlemi gibi süreçler nedeniyle termal hasar ortaya çıkabilir. Termal hasar, sıcaklık kaynaklı olarak canlı dokunun zarar görmesi ve nekroz (hücrelerin bölgesel ölümü veya geri dönüşümsüz şekilde hasar alması) oluşumuna yol açabilir [4]. Bu nedenle, ameliyatlarda yapılan kesme işlemi önem arz etmektedir. Matkap ucu seçimi, geometrisine bağlı olarak ilerleme hızı, dönme hızı ve matkap ucu açısı gibi parametreler termal hasar üzerinde etkili olan faktörler arasında yer alır [5].

Alam vd. [6], yaptıkları deneylerde matkap ucu aşınma sürecinde kesme hızının yanı sıra delme kuvveti ve tork gibi faktörlerin de etkili olduğunu göstermişlerdir. Önerilen parametreler ise şu şekildedir: ilerleme hızı 30 mm/s, 2000 rpm devir ve kesici kenar pürüzlülüğü 2 mm'dir. Soğutucu sıvılar, bu tür işlemlerin yapıldığı ortamları iyileştirebilir. Örneğin, Effatparvar vd. [7] yaptıkları deneylerde normal salinle harici soğutma, soğutmasız delme ve OpSite sprey ile harici soğutmaya kıyaslamış ve salinle yapılan soğutma işleminin, soğutma olmayan koşullara göre daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra, OpSite ile yapılan deneylerde ise diğer soğutma şekillerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

İş parçasının hedeflenen kalite ve performans seviyesine ulaşması için delme işlemleri, imalat süreçlerinde simülasyon ve tasarım aşamaları ile daha ulaşılabilir hale gelmiştir [8]. Bu tür süreçlerde başvurulan analiz tekniklerinden biri de sonlu elemanlar yöntemidir. Yüklemeler karşısında davranış biçimlerini inceleyen ve Parçaları daha küçük elemanlara ayırarak stres, gerilme, sıcaklık gibi birçok parametreyi hesaplayan cebirsel bir simülasyon türüdür [9, 10]. Yapılan çalışmalarda, istenen işleme şekli kullanılarak kesme parametrelerinin etkileri kayda geçirilebilmektedir [11]. Malzemelerin farklı yüklemeler karşısında davranış biçimini incelemek adına analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu simülasyon türleri şöyle sıralanabilir; foto-elastik kuvvet analiz yöntemi, gerilim ölçer kullanarak gerilme analiz yöntemi, termografik gerilme analiz yöntemi, lazer ışını ile gerilme analiz yöntemi olarak sıralanabilir. Komplike sistemlerin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) mühendislik, diş hekimliği, tıp ve biyomekanik gibi dallarda öne çıkan bir analiz biçimidir [12]. Bu analizlerde, çözüm sürecinde farklı teorik modeller kullanılır ve denge denklemleri ile sınır koşullarının tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar elde edilir [13]. Örneğin Gholampour vd. [14], gerçekleştirdikleri simülasyonda CO₂ soğutma süreçleri için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır; CO₂ soğutucularının, maksimum sıcaklık, itme kuvveti ve torku azaltmadaki verimlilik oranlarının geleneksel soğutmaya nazaran daha iyi sonuçlar elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada, delme işlemi esnasında karşılaşılan termal hasar (47 °C [15]) gibi durumların incelenmesi adına kortikal kemik ve paslanmaz çelik (4Cr13) matkap ucu ile 2 (soğutmalı/soğutmasız) tür analiz incelenmiştir. Yapılan analizlerde sıcaklık ve Von Mises çıktıları elde edilmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1 Materyal (Material)

Delme simülasyonu, Abaqus CAE programı (öğrenci sürümü) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delme işleminde kullanılan parçalar, Autodesk Fusion 360 (öğrenci sürümü) ile tasarlanmıştır. Öğrenci sürümünün düğüm limiti nedeniyle, kesici uç ve iş parçası daha sade ve basitleştirilmiş bir model olarak oluşturulmuştur.

2.1.2 Analizde kullanılan metotlar (The methods used in the analysis)

Johnson Cook modeli, Denklem 1'de verilen formül ile açıklanmaktadır. Plastik deformasyon altındaki malzemelerin plastik şekil değiştirme davranışını tanımlayan matematiksel modellerden biridir. Bu model, gerilmenin plastik gerilme, plastik gerilme hızı ve sıcaklık değişimlerine bağlı olmasına dayanmaktadır.

Malzeme hasarının öngörülmesi, kesme ve delme işlemleri, balistik, darbe etkileri ve termal yüklemeler gibi dinamik süreçlerde kullanılmaktadır [16-18].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n \left[1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}^*}{\dot{\varepsilon}_0^*}\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right)^m\right]) \quad (1)$$

Johnson-cook modelindeki parametrelerin tanımı; A: Akma gerilmesi, B: Plastik Pekleşme parametresi, ε^n : Plastik gerinim, n: Plastik pekleşme üssü, C: Plastik deformasyon katsayısı, $\dot{\varepsilon}^*$: Şekil değiştirme hızı, $\dot{\varepsilon}_0^*$: Plastik deformasyon oranı, m: Sıcaklık bağımlılığı, T_{melt} : Erime sıcaklığı, T_0 : Ortam sıcaklığı şeklindedir. İş parçasının soğutulması için kullanılan film (ısı transferi) katsayısı [19], Denklem 2’de verilen formül ile gösterilmektedir.

$$h = \frac{Nu \cdot kf}{L} \quad (2)$$

Analiz için h değeri 250 W/m².K [19] ve hava sıcaklığı ise 5 °C olarak alınmıştır.

2.1.3 Malzeme özellikleri (Material properties)

Malzeme özellikleri, ilgili akademik makaleler referans gösterilerek belirlenmiştir. Kemik, izotropik bir malzeme olarak modellenmiştir. Matkap ucu ve kemiğin malzeme özellikleri Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Matkap ucu ve iş parçasının özellikleri [10]

	Matkap ucu (Paslanmaz çelik 4Cr13)	İş parçası (kortikal kemik)
Yoğunluk (kg/m ³)	7840	2000
E modülü (GPa)	21.0	20,0
Poisson oranı	0,3	0,36
Isıl iletkenlik (W/m.K)	460	0,56
Özgül ısı (J/Kg.K)	29,0	1640

Analizlerde kullanılan kortikal kemik modeli için kullanılan johnson-Cook hasar parametreleri değerleri Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Plastik Johnson-Cook hasar parametreleri [10]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	M	T_m (°C)	T_r (°C)
50	101	0,08	0,03	1,03	1300	25

Abaqus programında yapılan analizler için giriş parametreleri Tablo 3’te yer almaktadır.

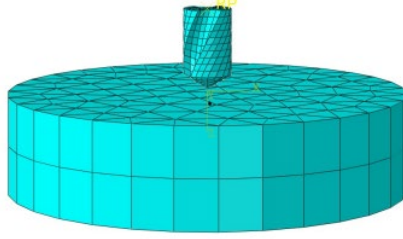
Tablo 3. Programda kullanılan giriş parametreleri

	1.Analiz	2.Analiz
Matkap ucu (mm)	3	3
Matkap uç açısı(°)	120	120
İlerleme hızı(mm/s)	2	2
Dönme hızı (rad/s)	50	50
Süre (s)	6	6
Kemik çapı (mm) (Ø)	25	25
Kemik kalınlığı mm)	6	6
T _{hava} (°C)	---	5
h _{film} (W/m ² .K)	---	250

2.2 Yöntem (Method)

2.2.1 Ağ modeli (Mesh model)

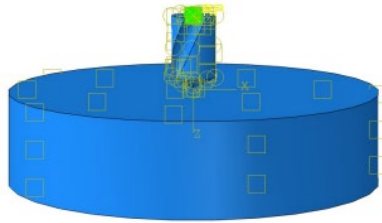
Mesh (ağ), parçaların fiziksel yapısının sayısal alana dönüştürüldüğü aşamadır. Elemanın boyutu, kalitesi ve eleman tipi burada belirlenir [20]. Öğrenci sürümünün düğüm limiti kısıtlamalarına uygun bir modelleme yapılmıştır. İş parçası ile matkap ucu için sırasıyla 346 ve 440 adet eleman kullanılmıştır. Ağ modeli Şekil 1’de görülmektedir.



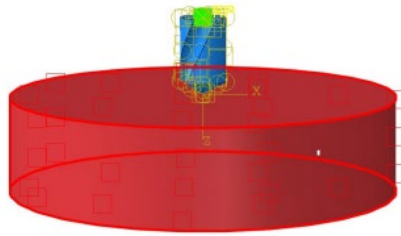
Şekil 1. Ağ modeli

2.2.2. Parçalar arası etkileşim (Interaction between parts)

Parçalar arasındaki, hareket, sürtünme v.b bağlantıların eklendiği aşamadır [20]. İki parça arasındaki etkileşim Şekil 2’de görülmektedir, yüzeyler arası (surface to surface) bağlantı modeli kullanılmıştır. Etkileşim durumunda oluşabilecek sürtünme, ısı üretimi gibi parametreler de yine bu temas yüzeylerine eklenmiştir. Matkap ucuna katılık (rijitlik/rigid body) özelliği de burada tanımlanmıştır. Bu aşama, aynı zaman da 2.analizde kullanılan hava film tabakasının da eklendiği bölümdür ve Şekil 3’te gösterilmiştir.



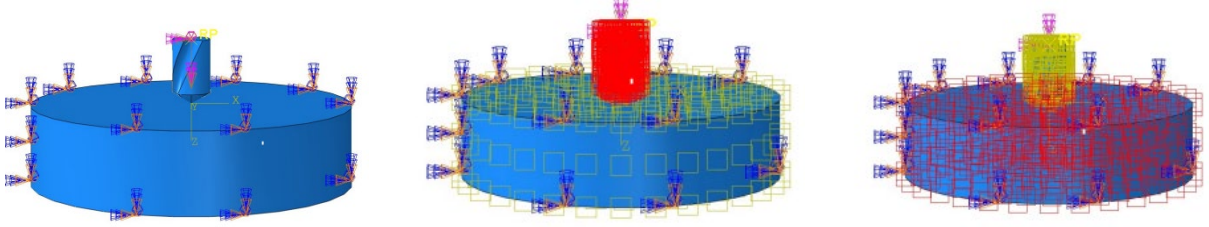
Şekil 2. Parçalar arası etkileşim



Şekil 3. İş parçasına atanan hava film tabakası

2.2.3 Yükleme ve sınır şartlarının tanımlanması (Defining loading and boundary conditions)

Matkap ucu için dönme ve ilerleme hızları gibi sınır koşullarının eklendiği aşamadır [20]. Ayrıca başlangıç sıcaklıkları da kısımda tanımlanmıştır. Her iki parça için başlangıç sıcaklığı 25 °C olarak belirlenmiştir. Yükleme ve sınır şartlarının tanımlanması, matkap ucu ve iş parçası başlangıç sıcaklık ataması gibi işlem tanımlamaları Şekil 4'te görülmektedir.



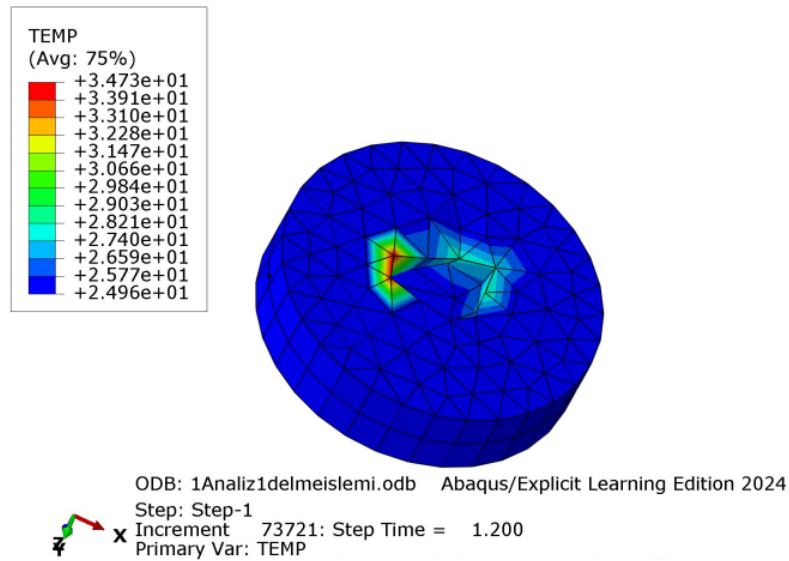
Şekil 4. Yükleme, sınır şartları ve başlangıç sıcaklık tanımlamaları

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Analiz için toplam süre 6 saniyedir. İlk olarak, delme işlemi herhangi bir soğutma olmadan yapılmıştır, daha sonra soğutma için hava film tabakası kullanılmıştır. İlerleme hızı 2 mm/s ve dönme hızı 50 rad/s olarak belirlenmiştir. 1.analizde maksimum sıcaklık ve gerilme değerleri sırasıyla 34,73 °C ve 160,8 MPa olarak ölçülmüştür. Hava film tabakası kullanılarak yapılan 2.analizde ise maksimum sıcaklık ve gerilme değerleri sırasıyla 27,32 °C ve 148,1 MPa olarak ölçülmüştür.

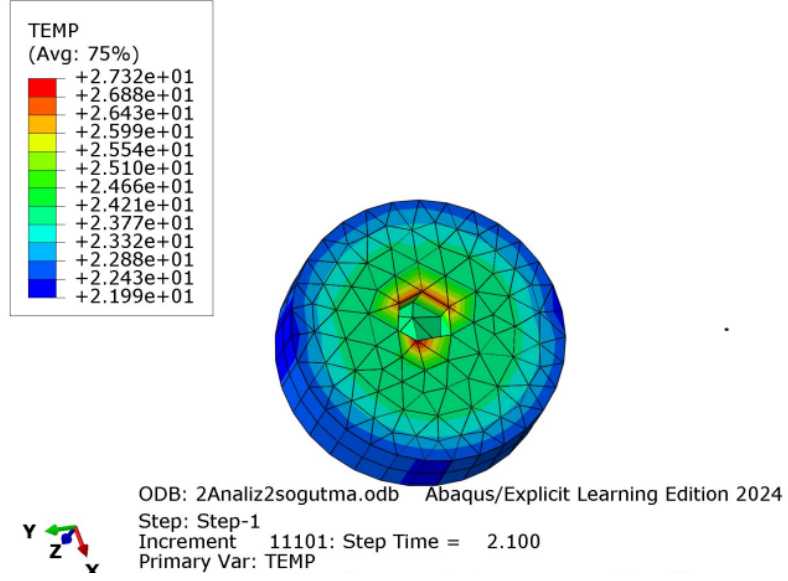
3.1 Sıcaklık Çıktıları (Temperature Outputs)

1.Analiz için Şekil 5'te görülen maksimum sıcaklık değeri 34,73 °C olarak görülmektedir.



Şekil 5. 1.Analiz-sıcaklık (°C) görüntüsü

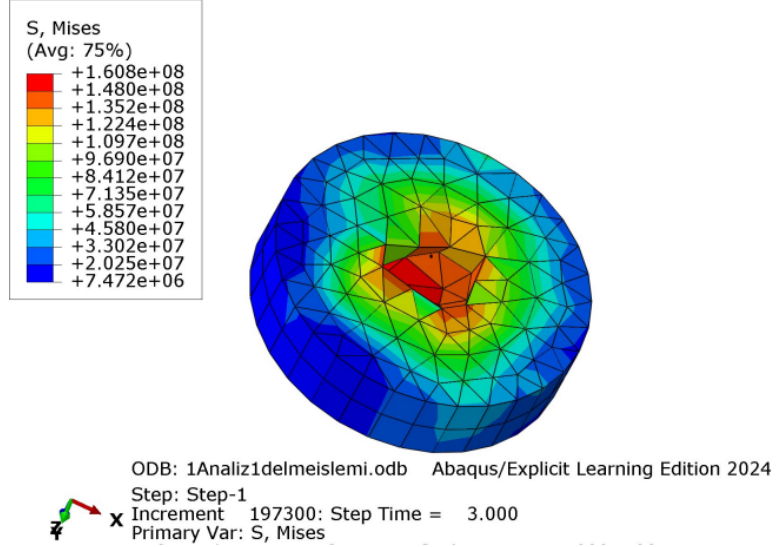
2.Analiz için hava film tabakası kullanılmıştır. Şekil 6’da, Maksimum sıcaklık değeri 27,32 °C olarak görülmektedir.



Şekil 6. 2.Analiz-sıcaklık (°C) görüntüsü

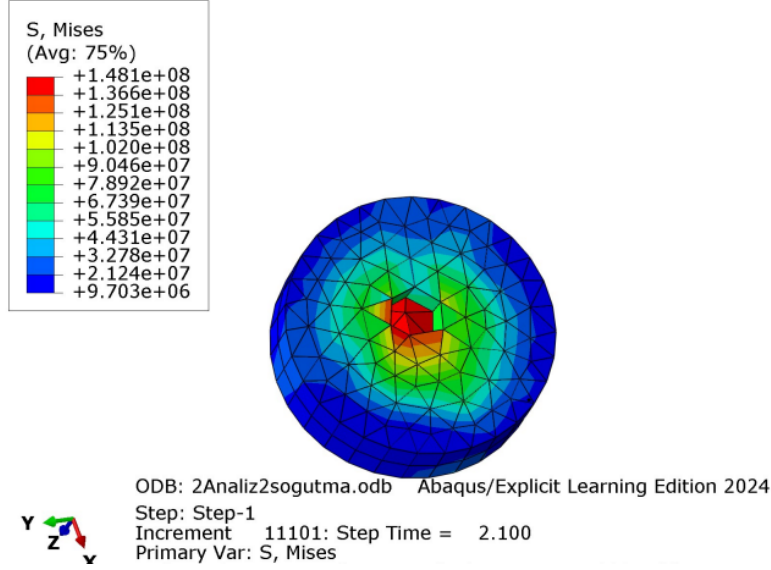
3.2 Gerilme Çıktıları (Stress Outputs)

1.Analiz için Şekil 7’de maksimum gerilme değeri 160,8 MPa olarak görülmektedir.



Şekil 7. 1.Analiz-gerilme (Pa) görüntüsü

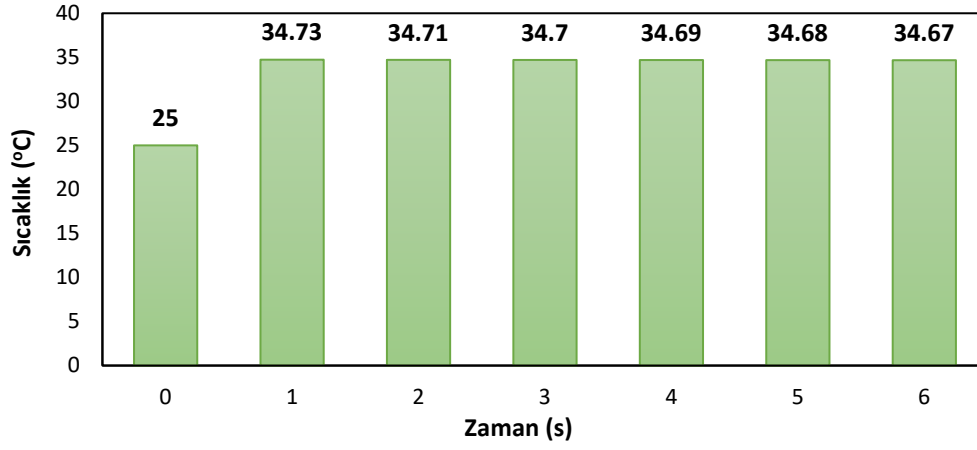
2.Analiz için hava film tabakası kullanılmıştır. Şekil 8’de maksimum gerilme değeri 148,1 MPa olarak görülmektedir.



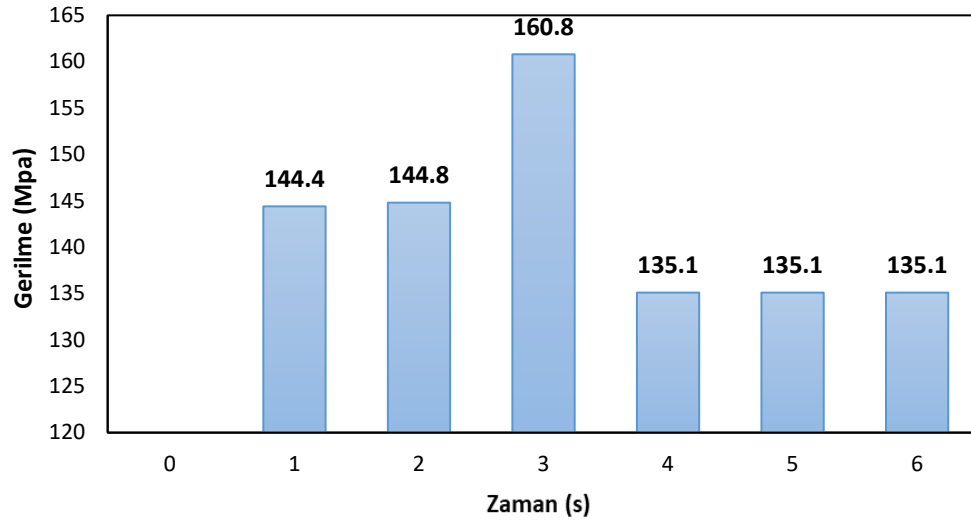
Şekil 8. 2.Analiz-gerilme (Pa) görüntüsü

İş parçası için kullanılan değerler, 2022 yılında yayımlanmış deneysel veriler temel alınarak belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda Wang vd. [10], yaptıkları çalışmada ilk olarak Abaqus programında gerçekleştirdikleri delme işleminde Johnson-Cook modelini kullanmış, kemiği izotropik bir malzeme olarak modellemişlerdir. Analizde ilerleme ve dönme hızları sabit tutulmuş, ayrıca soğutucu akışkan kullanılmamıştır. Analiz çıktısı olarak NT11 değişkeni elde edilmiş olup, bu değişken modeldeki her bir düğüm noktasındaki sıcaklık değerlerini göstermektedir. İşlem süresi 6 saniye olarak belirlenmiştir. Analizde 1,33 mm/s (80 mm/dk) ilerleme hızı ve 104,72 rad/s (1000 rpm) dönme hızı kullanılmıştır. Başlangıç sıcaklığı 25 °C olarak ayarlanmış, zaman içerisindeki delme sıcaklığına bakıldığında maksimum sıcaklık ise 40,1 °C olarak tespit edilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise Umer vd. [15], Kortikal Kemiği transvers izotropik malzeme olarak modellemişlerdir. İlerleme hızı ve dönme hızları sırasıyla 0.5 mm/s (30 mm/dk) ve 62,83 rad/s (600 rpm) olarak belirlenmiştir. Çalışmada, yüksek sıcaklıkların (50,8 °C) yalnızca küçük bir alanda oluştuğunu, diğer büyük ölçekli alanların ise termal hasara neden olabilecek sıcaklık değerlerin (47 °C) altında kaldığını tespit etmişlerdir. Liu vd. [21], analiz için farklı matkap çapları, ilerleme hızları ve dönme hızları kullanmışlardır. Bu parametreler şu şekildedir; matkap çapları 7mm, 9mm ve 11 mm, ilerleme hızları: 0,5 mm/s 1 mm/s 1.5 mm/s ve dönme hızları; 52,36 rad/s (500 rpm), 73,26 rad/s (700 rpm), ve 94,25 rad/s (900 rpm) olarak belirlenmiştir. Yapılan işlemler sonucunda maksimum sıcaklık değeri 67,58 °C olarak ölçülmüş ve bu değere karşılık gelen parametreler 11 mm çaplı matkap ucu, 1 mm/s (60 mm/dk) ilerleme hızı ve 94,25 rad/s (900 rpm) dönme hızı olmuştur. En düşük sıcaklık ise 48,46 °C olarak belirlenmiş olup, bu değere karşılık gelen parametreler ise 9 mm çaplı matkap ucu, 0,5 mm/s (30 mm/dk) ilerleme hızı ve 52,36 rad/s (500 rpm) dönme hızı olarak kaydedilmiştir. İlk analizde, görülen maksimum sıcaklık 34,73 °C olarak tespit edilmiştir. Delme bölgesine yakın alanlarda sıcaklık değeri 27-28 °C arasında ölçülmüştür ve bu değer termal hasar oluşumunun altındadır. Maksimum gerilme değeri ise 160,8 MPa olarak ölçülmüştür. İş parçasının genel olarak delme çevresinde görülen gerilme değeri 70-134 MPa arasında kalmaktadır. İkinci analizde ise hava film tabakası kullanılmıştır. Bu durumda, sıcaklık 27,32 °C ve gerilme değeri de 148,1 MPa'dır. Delme bölgesine yakın alanlarda ise sıcaklık 23-25 °C arasında, gerilme değerleri ise 70-113 MPa arasında ölçülmüştür.

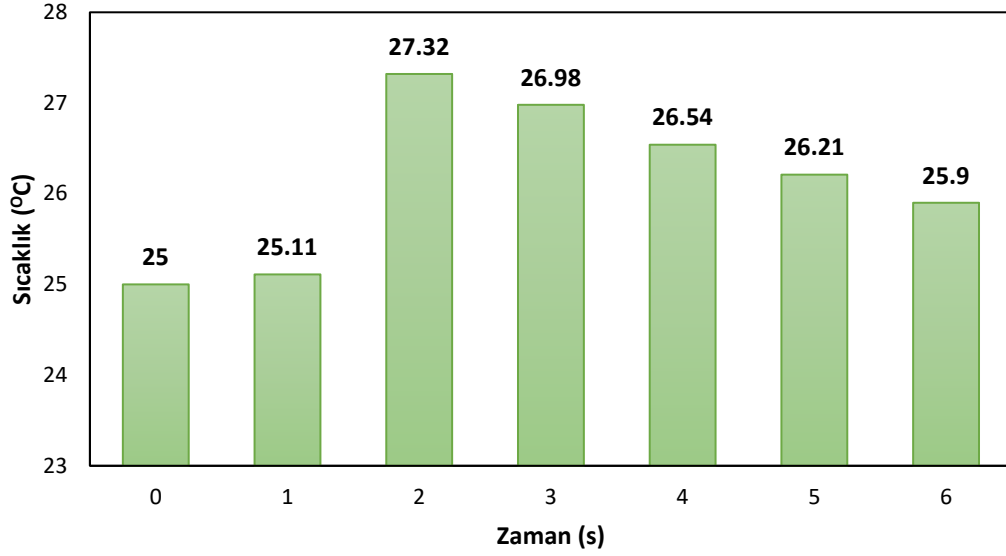
Simülasyon sonucunda elde edilen sıcaklık ve Von Mises gerilme değerlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 9-12'de gösterilmektedir.



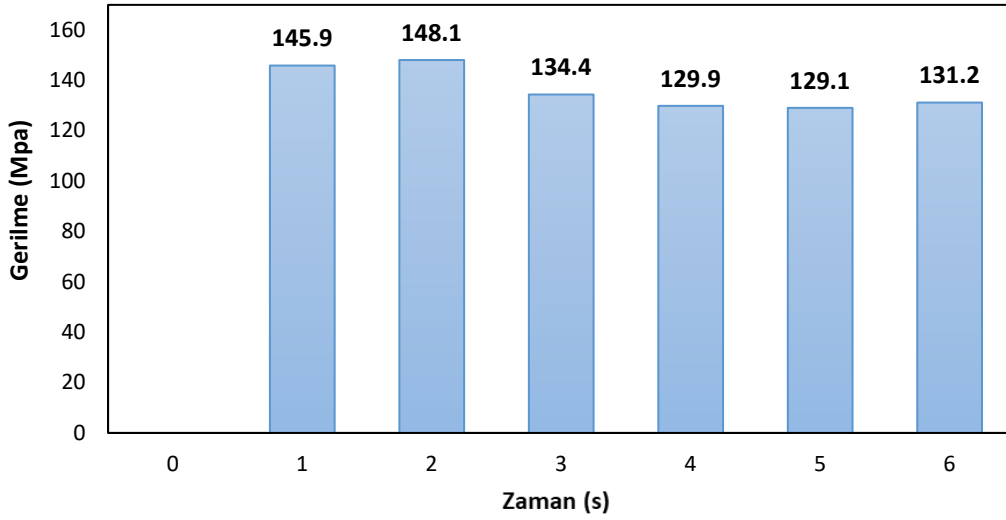
Şekil 9. Sıcaklık- zaman grafiği (1.Analiz)



Şekil 10. Gerilme- zaman grafiği (1.Analiz)



Şekil 11. Sıcaklık- zaman grafiği (2.Analiz)



Şekil 12. Gerilme- zaman grafiği (2. Analiz)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmada, matkap ucu ile parça delme analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde, soğutucu sıvının etkisini gözlemlemek amacıyla bir soğutucu film tabakası uygulanmış ve başlangıç sıcaklığı 5 °C olarak belirlenmiştir. İlk aşamada, soğutma olmadan delme işlemi gerçekleştirilmiştir; sıcaklık ve Von Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum sıcaklık 34,73 °C olup, termal hasar eşiği olan 47 °C'nin altında kalmıştır. Gerilme değeri ise 160,8 MPa olarak tespit edilmiştir. Daha sonra, soğutma amacıyla hava film tabakası kullanılarak analiz tekrar yapılmıştır. İlerleme ve dönme hızları sabit tutulmuş (2 mm/s ve 50 rad/s) ve iş parçası ile matkap ucunun başlangıç sıcaklığı 25 °C olarak belirlenmiştir. Bu analizde maksimum sıcaklık 27,32 °C, gerilme değeri ise 148,1 MPa olarak ölçülmüştür. Bazı alanlarda, gerilmelerde düşüş yaşanmıştır. Yaşanan düşüşün sebepleri; soğutmanın malzemenin mekanik dayanımını artırması, sıcaklık farklarının azalmasıyla iç gerilmelerin düşmesi ve sürtünmenin azalmasıdır. Analiz sırasında karşılaşılan zorluklardan biri de mesh bölümündeki düğüm sınırıdır, daha detaylı bir analiz için mesh limitine ve iki parça arasındaki mesh uyumuna dikkat edilmelidir. İşlem sonunda ortaya çıkan

sıcaklık etkilerinin düşürülmesi için soğutucu akışkanlar, soğuk hava veya CO₂ gibi bir akışkan ile iş parçasında yapılacak olan işlem daha sağlıklı koşullar oluşturabilir ve daha düşük sıcaklıkların oluşmasını sağlayabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

ARAŞTIRMA ve YAYIN ETİĞİ BEYANI (STATEMENT OF PUBLICATION ETHICS)

Çalışmanın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atıf gösterme ilkelerine uyduğunu beyan ederiz.

YAZAR KATKISI (AUTHOR STATEMENT)

Aysel Eren: Veri Toplama, Veri İşleme, Literatür Taraması, Yazım.

Mehmet Dirilmiş: Fikir/Kavram, Tasarım ve Dizayn, Denetleme, Danışmanlık.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gürgül, S., Uzun, C., & Erdal, N. (2016). Kemik biyomekaniği. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 8(1), 18-34.
- [2] Topaloğlu, U., Ketani, M. A., & Saruhan, B. G. (2017). Kemik doku ve kemikleşme çeşitleri. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 10(1), 62-71.
- [3] Reis, A., Aslantaş, K., & Özkaya, E. (2021). Kemik Delme İşlemlerinde Farklı Kesme Koşullarının ve Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 24(4), 1567-1577.
- [4] Alam, K., Qamar, S. Z., Iqbal, M., Piya, S., Al-Kindi, M., Qureshi, A., ... & Silberschmidt, V. V. (2023). Effect of drill quality on biological damage in bone drilling. *Scientific Reports*, 13(1), 6234.
- [5] Yıldırım, S., (2021). *Nekroz ve Gangren. Veteriner Genel Patoloji (pp.36-53)*, Erzurum: Atatürk Araştırma Merkezi.
- [6] Alam K, Piya S, Al-Ghaithi A, Silberschmidt V. Experimental investigation on the effect of drill quality on the performance of bone drilling. *Biomed Tech (Berl)*. 2020 Jan 28;65(1):113-120.
- [7] Effatparvar MR, Jamshidi N, Mosavar A. Appraising efficiency of OpSite as coolant in drilling of bone. *J Orthop Surg Res*. 2020 May 29;15(1):197.
- [8] Yıldız, A. (2021). *Delik delme işleminin sümülsasyonu ve delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı mekanik gerilmelerin incelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s, Ankara.
- [9] İlgün, A., Korkmaz, H. H., Malkoç, S., & Başçıftçi, F. A. (2004). İnsan Mandibulasında Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Gerilme Analizi Yapılması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19(1), 29-38.
- [10] Wang, H., Gao, X., Wang, B., Wang, M., Liu, Y., Zan, T., ... & Liu, C. (2022). Evaluation of temperature distribution for bone drilling considering aging factor. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 16, 100174
- [11] Günay, M., Meral, T., & Korkmaz, M. E. (2018). AISI 420 Martenzitik paslanmaz çeliğin delinebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(3), 223-229.
- [12] Gümrükçü, Z., & Kurt, S. (2019). Sonlu Elemanlar Stres Analizi Yönteminin Implant Cerrahisinde Kullanımı. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 29(3), 534-541.
- [13] Güler, M., & Şen, S. (2016). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- [14] Gholampour S, Hassanalideh HH, Gholampour M, Frim D. Thermal and physical damage in skull base drilling using gas cooling modes: FEM simulation and experimental evaluation. *Comput Methods Programs Biomed*. 2021 Nov; 212:106463.

- [15] Umer, U., Abidi, M. H., & Alkhalefah, H. (2024). Analyses and optimization for cortical bone drilling via finite element models and MOGA-II. *Journal of Engineering Research*.
- [16] Nam, H. S., Kim, J. S., Han, J. J., Kim, J. W., & Kim, Y. J. (2015, February). Ductile fracture simulation for A106 Gr. B carbon steel under high strain rate loading condition. *In Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014)*, (p. 37). Woodhead Publishing
- [17] Li, L., Zhang, Y., Cui, X., Said, Z., Sharma, S., Liu, M., ... & Li, C. (2023). Mechanical behavior and modeling of grinding force: a comparative analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 102, 921-954.
- [18] Chen, C., Tu, Y., Chen, J., & Tang, E. (2023). Dynamic constitutive relationship of TiZrHfCu0.5 high entropy alloy based on Johnson-Cook model. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3729-3740.
- [19] Angin, D. (2012). *Isı ve kütle aktarımı ders notları*. Sakarya Üniversitesi. Retrieved from <https://www.foodelphi.com/isi-ve-kutle-aktarimi-ders-notlari-1-yrd-doc-dr-dilek-angin/>
- [20] DassaultSystèmes. (2024). *Abaqus Documentation*. Dassault-Systèmes.; <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/cae>
- [21] Liu, Z., Yao, Z., Jiang, W., & Wang, J. (2023). Analysis of the influence of surgical robot drilling parameters on the temperature of skull drilling based on Box–Behnken design. *Science Progress*, 106(2), 00368504231180027.



© Author(s) 2025. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>