



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kemik delme işlemlerinde farklı kesme koşullarının ve kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of different cutting conditions and cutting parameters on cutting temperature in bone drilling

Yazar(lar) (Author(s)): Abdurrahman REİS¹, Kubilay ASLANTAŞ², Ekrem ÖZKAYA³

ORCID¹: 0000-0002-4036-4824

ORCID²: 0000-0003-4558-4516

ORCID³: 0000-0002-4309-2238

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Reis A., Aslantaş K. ve Özkaya E., “Kemik delme işlemlerinde farklı kesme koşullarının ve kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1567-1577, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.734894

Kemik Delme İşlemlerinde Farklı Kesme Koşullarının ve Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

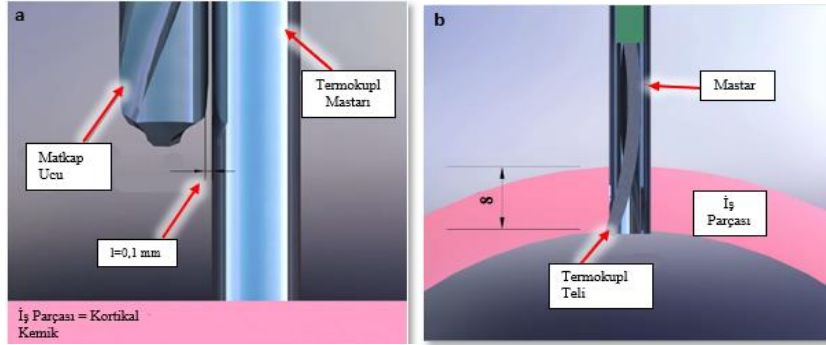
Investigation of The Effect of Different Cutting Conditions and Cutting Parameters on Cutting Temperature in Bone Drilling

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kemik delme işleminde kesme sıcaklığını tespit edebilmek için farklı bir deney düzeneği kullanılmıştır/ A different experimental setup was used to determine the temperature in bone drilling.
- ❖ Kesme parametrelerinin ve kesme koşullarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. / The effects of cutting parameters and cutting conditions on cutting temperature were evaluated.
- ❖ Matkap ucu geometrisinin ve malzemesinin etkileri incelenmiştir. / The effects of drill bit geometry and material were studied.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, kemik delme işleminde, kesme parametrelerinin ve kesme koşullarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. / In this study, the effects of cutting parameters and cutting conditions on cutting temperature were investigated in bone drilling.



Şekil. Kesme sıcaklığını ölçmek için kullanılan deney düzeneği/ Figure. Test setup used to measure the cutting temperature

Amaç (Aim)

Kemik delme işlemlerinde, kesme parametreleri, matkap ucu geometrisi, kesme metodu ve soğutma metodunun, kemik sıcaklığı üzerindeki etkilerini belirlemektir. / To determine the effects of cutting parameters, drill bit geometry, cutting method and cooling method on cutting temperature in bone drilling processes.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Deneysel sığır femur kemiği üzerinde gerçekleştirilmiş ve kesme sıcaklığı termokupl yöntemi ile ölçülmüştür. / Experiments were carried out on bovine femur bone and the cutting temperature was measured by thermocouple method.

Özgünlük (Originality)

Kesme sıcaklığı, delme yüzeyine 0.1mm gibi çok yakın bir mesafeden ölçülmüştür. / The cutting temperature was measured as close as 0.1mm to the drilling surface.

Bulgular (Findings)

Uç açısı, helis açısı kadar kesme sıcaklığını etkilememektedir. Artan ilerleme değeri kesme sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Kuru/yetersiz soğutma koşulları kritik nekroz sıcaklığının üzerine çıkılmasına neden olmaktadır. / The point angle does not affect the cutting temperature as much as the helix angle. Increasing feedrate causes a decrease in cutting temperature. Dry / insufficient cooling conditions cause the critical necrosis temperature to exceed.

Sonuç (Conclusion)

Nekroz etkisini bertaraf edebilmek için yüksek ilerleme hızları ve düşük devir sayıları kullanılabilir. Sürekli delme yerine gagalama tekniği ve yüksek debide soğutucu kullanılmalı. / High feed rates and low spindle speeds can be used to eliminate the necrosis effect. Pecking technique instead of continuous drilling and high flow rate coolant should be used.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kemik Delme İşleminde Farklı Kesme Koşullarının ve Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Abdurrahman REİS^{*1}, Kubilay ASLANTAŞ¹, Ekrem ÖZKAYA²

¹Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

²Institute of Machining Technology, Technische Universität Dortmund, Germany

(Geliş/Received : 24.06.2020 ; Kabul/Accepted : 24.10.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 23.11.2020)

ÖZ

Bu çalışmada, kemik delme işleminde farklı takım geometrisinin, takım malzemesinin, farklı kesme koşullarının ve parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Delme işlemi sırasında nekroza neden olan veya olabilecek olan tüm unsurlar belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde 12 saat önce canlı olan sığırın femur kemikleri kullanılmış ve delme bölgesine çok yakın noktalarda kesme sıcaklığı deneysel olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kesme esnasında kullanılan devir sayısı kesme sıcaklığını en çok etkileyen kesme parametresidir. İlerlemenin artması kesme sıcaklığında düşüşe neden olmaktadır. Galalama tekniği ile delik delinmesi, kesme bölgesindeki sıcaklığın önemli ölçüde azalmasına katkıda bulunmaktadır. Galalama tekniği kesme sıcaklığını önemli ölçüde düşürmektedir. Düşük debide uygulanan salin sıvısı matkap kanallarının tıkanmasına sebep olurken, 0,04 l/dk debide uygulanan salin sıvısı kesme sıcaklığını düşürmektedir. AISI-316L malzemeden üretilmiş matkap uçlarında daha düşük kesme sıcaklıkları gözlemlenmiştir. Aynı zamanda matkap geometrisinin etkilerine yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kemik delme, osteonekroz, kesme sıvısı, kesme sıcaklığı.

Investigation of the Effect of Different Cutting Conditions and Cutting Parameters on Cutting Temperature in Bone Drilling Process

ABSTRACT

In this study, the effect of different tool geometry, tool material, different cutting conditions and parameters on the cutting temperature was investigated experimentally. All factors that may cause necrosis during the drilling process were tried to be determined. Femur bones of the cattle that were alive 12 hours ago were used in the experiments and the cutting temperature was determined experimentally at the points very close to the puncture site. According to the results obtained, speed is the parameter that most affects the cutting temperature. Increasing feed rate causes a decrease in cutting temperature. Drilling holes with pecking technique contributes to a significant reduction in temperature in the cutting zone. The pecking technique significantly reduces the cutting temperature. Saline fluid applied at low flow causes the drill flutes to clog while saline fluid applied at the flow rate of 0.04 l/min lowers cutting temperature. Lower cutting temperatures were observed in drill bits made of AISI-316L material. Also, the effects of drill geometry are included.

Keywords: Bone drilling, osteonecrosis, cutting fluid, cutting temperature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlar günlük hayatlarında kazalar veya istenmeyen travmalarla karşı karşıya gelebilirler ve iskelet sisteminde kırık, çatlak gibi ciddi hasarlar oluşabilir. Kemik kırığı gibi ciddi problemlerde kemiğin kaynamasına yardımcı olacak profesyonel ortopedik cerrahi yöntemleri devreye girmektedir. Ortopedik cerrahide kemik delme işleminde cerrah tarafından elle müdahale edilen motor sürücülü araçlar kullanılır. Kemik fiksasyonu plakalar ve vidalar yardımıyla yapılmaktadır. Fiksasyon kemiğin en sert dokusu olan kortikal kemik delinerek yapılmaktadır.

Delme işlemi sırasında sürtünme ve kayma deformasyonundan dolayı matkap ve kemik ara yüzünde bir ısı meydana gelmektedir. Bu ısı kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına neden olur. Kritik sıcaklık değeri aşıldığı takdirde, kemik ve çevre dokularında geri dönüşü olmayan hasarlar meydana gelir. Nekroz (necrosis) olarak adlandırılan bu olayda kemiğin doğal yapısı değişmekte ve hücre yapısı bozulmaktadır. Nekroza sebep olan en büyük etmen artan kemik sıcaklığından dolayı kemik dokusuna olan dolaşımın engellenmesi ve dehidrolize olmasıdır. Literatürde bu sınır sıcaklık ve sınır süre ilgili yapılan çalışmalara göre, sıcaklığın 1 dakika boyunca 47°C'yi geçmesi halinde veya 1 saat boyunca 43°C'yi geçmesi durumunda nekroz

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : areis399@gmail.com

meydana gelmektedir [1-5]. Aynı zamanda Mortiz ve Henrique [6] yaptıkları çalışmada kemiğin 70°C'nin üzerinde bir sıcaklığa maruz kaldığında, hücrelerin çok hızlı bir şekilde zarar göreceğini bildirmişlerdir. Bazı araştırmacılara göre ise termal nekroz, implantasyon yapılan bölgede kemik rezorpsiyonu ile sonuçlandığı ve implantın gevşemesine ve osteosentezin (Kırık kemiğin uçlarının metalik, sentetik veya organik araçlarla, değişik yöntemlere göre birleştirilip tespit edilerek kemik bütünlüğünün sağlanmasına yönelik yapılan ameliyat) başarısız sonuçlanmasına sebep olduğunu bildirmişlerdir [4, 7-14].

Cerrahi matkap uçları, tipik olarak 0,5 mm ila birkaç milimetre arasında değişen çaplarda, boyutlarda mevcuttur ve seçilen çap uygulamaya özeldir [15]. Kalidindi [16] yaptığı çalışmada matkap çapının kemik sıcaklığına olan etkilerini araştırdığı çalışmasına göre, matkap çapı arttıkça kemik sıcaklığında eksponansiyel bir artış gözlemlenmiştir.

Literatürde uç açısının kemik delme üzerindeki etkileri ile ilgili farklı görüşler bildirilmiştir. Bu farklı sonuçların temel nedeni; kemiğin anizotropik doğasına, mekanik özelliklerine ve farklı konumlardaki farklı kemik gözenekliliğine atfedilebilir [17]. Lee vd. [18] matkap çapı, uç açısı, helis açısı, kesme hızı ve ilerleme hızının kemik delme üzerindeki etkilerini araştırmak üzere bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modele göre uç açısı artışı ile kemik sıcaklığı artış göstermektedir. Akhbar ve Yusoff [19], sonlu elemanlar metodu kullanarak tasarladıkları kemik delme modelinde, delme parametrelerinin ve matkap ucu geometrisinin kemik sıcaklığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları analizleri doğrulamak amacıyla sığır femur kemikleri üzerinde bir dizi deney yapmışlardır. Deneylerinde 60° ile 170° arasında uç açılı matkap uçları kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, seçilen uç açısı parametreleri arasından 110° ila 140° arasındaki matkap uç açılarının, daha düşük kesme sıcaklığına neden olduğu ifade edilmiştir. Fuchserberger [20] ise tüm bu yüksek uç açısı önerilerine rağmen, minimum kesme sıcaklığı için 70° uç açılı matkap uçlarının kullanımını önermiştir. Ancak 90° uç açısının önerildiği çalışmalarda mevcuttur [21-22].

Delik delme işlemlerinde önemli bir takım geometrisi de helis açısıdır. Helis açısı özellikle talaşın tahliyesi için önem arz etmektedir. Farnworth ve Burton [23] çalışmalarında geliştirdikleri matematiksel modele göre helis açısı arttıkça, kesme sıcaklığında düşüş gözlemlenmiştir. Literatürde düşük helis açılı matkap uçlarının da etkili ve daha düşük sıcaklıklara sebep olduğunu savunanlar da mevcuttur [19].

Ultrasonik kesme (ürün deformasyonunu azaltmak amacıyla, kesici takımlara belirli frenkanslarda titreşim uygulanması) gibi talaşlı imalatta kullanılan bazı kesme yöntemleri kemik delme işleminde de kullanılmıştır. Burada ki birinci öncelikli amaç yüzey kalitesi olmayıp kesme sıcaklığına etkisini gözlemlemektir. Wang vd. [24], kemik delme işlemlerinde ultrasonik delik delme

tekniklerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini araştırdıklarını çalışmalarında, ultrasonik delik delmenin daha düşük kesme sıcaklıklarına sebep olmasının yanında kesme hızının artışı ile sıcaklıkta bir artış görüldüğünü savunmuşlardır. Benzer şekilde literatürde kesme hızının/devir sayısının artışı ile kesme bölgesindeki sıcaklığın da arttığı ifade edilen çalışmalara rastlamak mümkün [25-26].

Delik delme işleminde, yüksek ilerleme hızlarında daha büyük kesme enerjisine ihtiyaç duyulur. Bunun sonucunda sürtünme ile ortama yayılan ısı artar. Dolayısıyla ile yüksek ilerleme hızları kesme bölgesinde ısı oluşumunu artırır. Üretilen ısının miktarı önemli olmakla beraber, kemiğin kesme sıcaklığına maruz kalma süresi de bir o kadar önemlidir. Delme süresi, doğrudan daha yüksek ilerleme hızının daha kısa delme süresine yol açtığı ilerleme hızına bağlıdır. Bu nedenle ilerleme hızı kemikteki sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkileyecektir [27]. Literatürde tutarlı birçok çalışmada ilerleme hızının artırılması ile maksimum kesme sıcaklığında düşüş olduğunu gözlemlenmiştir [2, 9, 12, 26, 28-29].

Cerrahi operasyonlarda kesme bölgesinin soğutulması düşük debi (damla sulama) ile gerçekleştirilir. Bu işlem daha çok bir enjektör vasıtası ile, salin (%0,9 NaCl (tuz) çözeltisi) sıvısının operasyon bölgesine damla sulama ile zerk edilmesinden ibarettir. Literatürde soğutma metodolojisi üzerine çalışmalarda iki tip soğutma şekli dikkat çekmektedir. Bunlar matkap içerisindeki kanallar vasıtası ile içeriden soğutma ve dışarıdan soğutmadır. Shakouri vd. [30] yaptıkları çalışmada, kuru delme, gaz soğutmalı ve sıvı soğutmalı delme işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Gaz soğutucu olarak CO₂ ve N₂ gazlarını, dahili soğutuculu matkap ucu kullanarak kesme bölgesine zerk etmişlerdir. Sonuçlara göre salin sıvısı kullanımında kesme hızının artışı ile kesme sıcaklığındaki artış dikkat çekmektedir. CO₂ ve N₂ gazlarında ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirine yakındır. Salin sıvısı yüksek kesme hızlarında kesme bölgesine ulaşamadığından düşük kesme hızlarında iyi sonuç vermiştir.

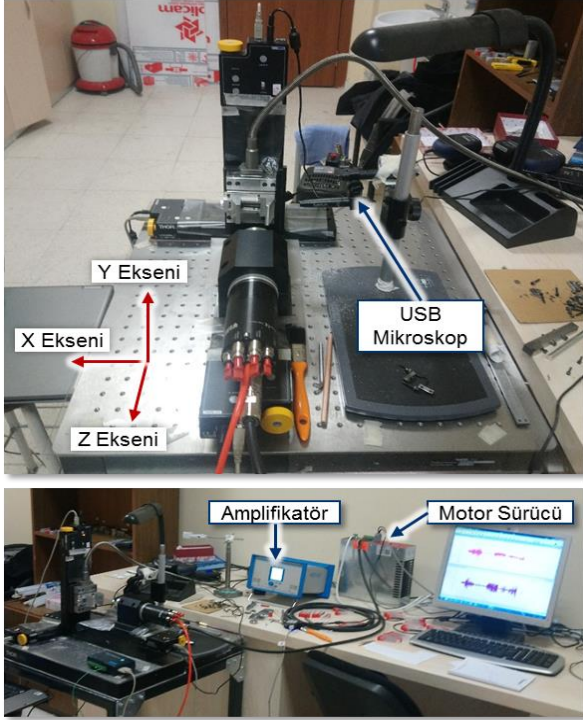
Yukarıda verilen literatür bilgisinde de görüleceği üzere, şu ana kadar kemik delme işlemlerinde kesme parametreleri ve kesme şartları çokça çalışılmıştır. Bu çalışmada ise literatürde hakkında çok az çalışma olan, kesici takım malzemesi (paslanmaz çelik ve tungsten karbür) ve delme yönteminin (gagalama ve süreklidelme) kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL METHODS)

2.1 Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Çalışmanın deneysel kısmında delme testleri için özel tasarlanmış bir mikro işleme sistemi kullanılmıştır (Şekil 1). Numune kemik dinamometre üzerine sabitlenmiştir. Eksen hareketleri için mikro step motorlarla

desteklenmiş ThorLabs lineer kızaklar kullanılmıştır. Eksenlerin tekrarlanabilirlik hassasiyeti $0,4\mu\text{m}$ dur. Spindle olarak IMT marka maksimum 2,7 kW gücünde ve maksimum 60000dev/dak. hızına sahip bir motor kullanılmıştır. Delme işlemi esnasında meydana gelen ilerleme kuvveti ve delme torku Kistler mini dinamometre vasıtasıyla ölçülmüştür.

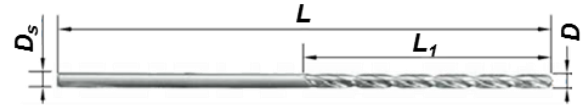


Şekil 1. Delme işleminde kullanılan deney düzeneği (Test setup used in the drilling process).

2.2 Kesici Takımlar (Cutting Tools)

Kemik delme deneylerinde kullanılmak üzere iki farklı kesici takım malzemesi kullanıldı. Bunlar; paslanmaz

çelik (AISI 316L) ve tungsten karbür (WC) dür. AISI 316L matkap uçları cerrahi operasyonlarda kullanılmaktadır ve Safir Surgical Instruments firmasından tedarik edilmiştir. Paslanmaz çelik cerrahi matkaplar %66,52 demir, %17,8 krom, %12,5 nikel, %2,1 molibden, %1 silisyum ve %0,08 karbon alaşımıdır %30 soğuk şekillendirildikten sonra tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Tungsten karbür matkaplar %88 tungsten %12 kobalt içeriğine sahip karbür çubuktan üretilmiştir. Çalışmada kullanılan matkap uçunun görüntüsü Şekil 2 de verilmektedir. Çizelge 1'de ise çalışmada kullanılan matkap uçlarının geometrik özellikleri verilmiştir. Geometrik parametrelerinin etkilerini araştırmak üzere farklı uç ve helis açıları kullanılmıştır (Çizelge 2). Buna göre tungsten karbür malzemeden uç açısının etkilerinin gözlemleneceği deneyler için 19° helis açısı sabit tutularak 70° , 90° , 100° ve 130° uç açılına sahip matkap uçları üretilmiştir. Benzer şekilde helis açısının etkilerinin gözlemleneceği deneylerde kullanılmak üzere uç açısı 110° de sabit tutularak 12° , 19° ve 30° helis açılarına sahip matkap uçları üretilmiştir. Matkap uçlarında kullanılan sabit parametreler ise Safir Surgical Instruments markasına ait cerrahi matkap uçlarının sahip olduğu parametreler olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan matkap uçlarında herhangi bir kaplama kullanılmamıştır. Cerrahi matkap uçlarında kullanılan kaplamalar genellikle biyo uyumlu olmaktadır ancak, kemiğe sıvanması durumunda implantasyonda kullanılan metaller ile tepkimeye girebilir.



Şekil 2. Cerrahi matkap ucu (Surgical Drill Bit).

Çizelge 1. Kesici takımların temel geometrik parametreleri (Basic geometrical parameters of cutting tools).

D	D _s	L	L ₁	Φ	λ	α	γ	Kanal	K	Helisel
Çap	Sap Çapı	Uzunluk	Kanal Uzunluğu	Uç Açısı	Helis Açısı	Serbest Açı	Talaş Açısı	derinliği	Öz Kalınlık	Adım
3mm*	3mm*	70mm*	35mm*	110°	19°	12° *	0° *	1mm*	1mm*	25,4mm

*Bu ölçüler tungsten karbür matkap uçlarında da sabittir.

Çizelge 2. WC-Co matkap uçlarının geometrik özellikleri (Geometrical properties of WC-Co drill bits.)

Uç Açısının Etkileri	Helis Açısı (λ)		Değişken Uç Açıları (ϕ)			
		19°		70°	90°	110°
Helis Açısının Etkileri	Uç Açısı (ϕ)		Değişken Helis Açıları (λ)			
		110°		12°	19°	30°

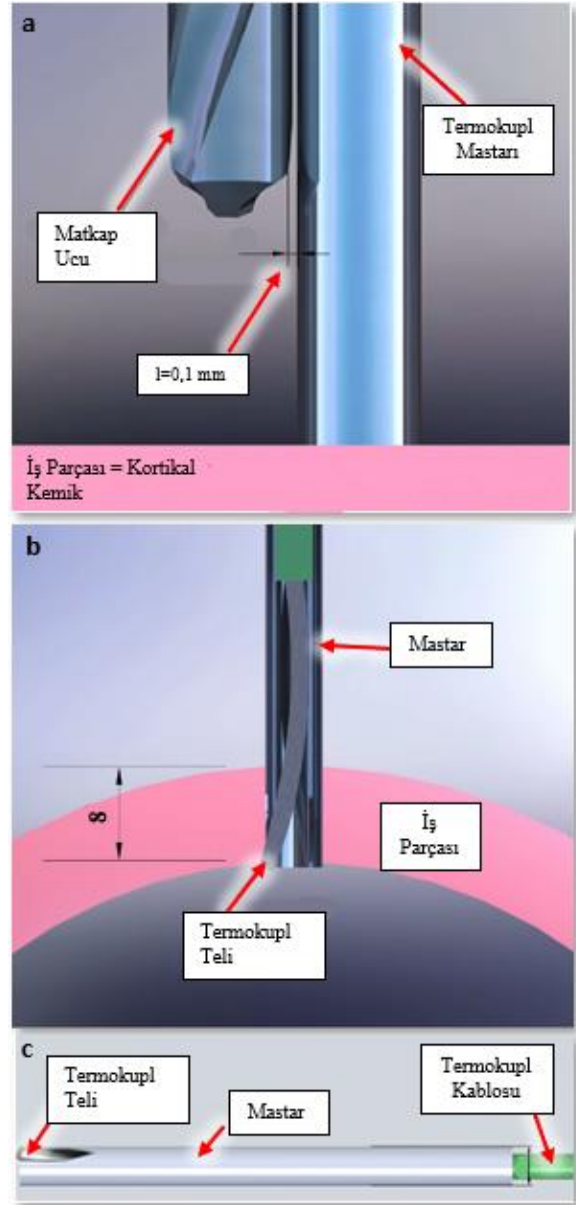
2.3 Kesme Sıcaklığının Ölçümü (Measurement of Cutting Temperature)

Kemik delme deneylerinde kesme sıcaklığının ölçülmesinde termokupl tekniği kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için K-Tipi termokupl kullanılmakla beraber, ölçüm sinyalleri Advantech USB-4718 model 8 kanallı taşınabilir veri toplama modülü aracılığı ile bilgisayara gönderilmiştir. Gönderilen sinyaller LabView yazılımında Advantech'in modülü aracılığıyla Sıcaklık-Zaman grafiklerine dönüştürülmüştür. Delme işlemi boyunca elde edilen maksimum kemik sıcaklığı baz alınmıştır. Termokupl delme noktasından 0,1 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Literatür araştırmasına göre delme derinliğinin artışı ile sıcaklığın maksimum değerler aldığı bilindiği için termokupl matkabın kemik kortikal kalınlığının tümünü delmek üzere olduğu noktaya (yaklaşık 8 mm) yerleştirilmiştir (Şekil 3.b). Stroveski vd. [31]'nin kullandıkları termokupl mastarına benzer bir mastar 3 mm çapında paslanmaz çelik boru malzemeden yapılmıştır. Bu işlem sonrasında, her bir ölçüm yapılacak delme işlemi öncesinde pilot delik açılması zorunluluğu ortadan kaldırılmıştır. Yapılan mastarın kullanım planı Şekil 3'te verilmiştir.

İlerleme kuvveti ve tork ise Kistler 9119AA1 dinamometre ile ölçülmüştür. Yine Kistler 5070 çok kanallı amplifikatör aracılığı ile kuvvet dataları kaydedilmiştir. Kuvvet ve tork ölçümleri için data alma frekansı 20 kHz'dir. Delik delme sırasında elde edilen ham verilerin bir örneği Şekil 4'te gösterilmiştir. Buna göre şekilde belirtilen her iki veri için de en stabil görünen b bölgesindeki verilerin ortalaması dikkate alınmıştır.

Deneylerde kuru, salin sıvısı, basınçlı hava ve -5°C basınçlı hava olmak üzere dört farklı yöntem kullanılmıştır. Kuru kesmenin dışında diğer kesme koşullarında kompresörden alınan basınçlı hava 2 bar basınçta sabitlenmiştir. Salin sıvısının debisi 0.04 l/dk olarak sabit alınmıştır. Aynı zamanda cerrahi uygulamada kullanılan şırınga içerisinde bizzat kesme bölgesine damlatma yapılarak uygulanan soğutma işlemi de denenmiştir. Soğutucu olarak havanın kullanıldığı durumda, hava basıncı 2 bar olarak sabit alınmıştır. Soğutulmuş hava $-5 \pm 1^{\circ}\text{C}$ de sabitlenmiştir.

Deneylerde kullanılan femur kemikleri yerel mezbahalarda ticari amaçlarla kesilen, görünür bir hastalığı bulunmayan ve 1 yaşından küçük sığırlardan temin edilmiştir. Deneyler, hayvanların ölümünü takip eden 12 saat içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Ayrıca numuneler delme testlerine kadar 16°C salin sıvısı içerisinde bekletilmiştir.

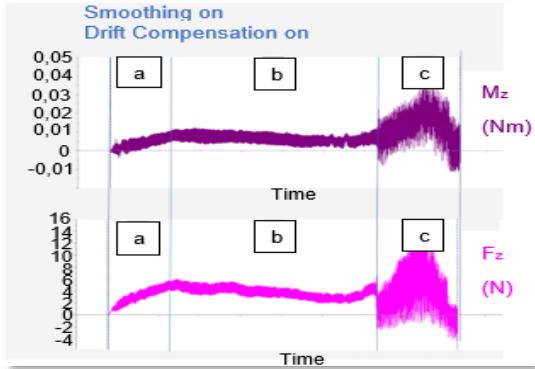


Şekil 3. Kesme sıcaklığının ölçümünde kullanılan termokupl sisteminin şematik görünümü a) Matkap ucu arasındaki mesafe, b) Kesit görüntüsü ve delme derinliği, c) mastarın genel görüntüsü (Schematic view of the thermocouple system used to measure the cutting temperature a) Distance between the drill bit, b) Sectional view and drilling depth, c) General view of the gauge)

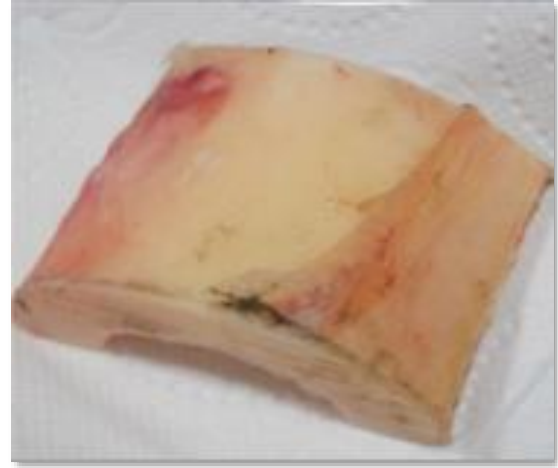
2.4 Kesme Parametreleri ve Deneş Takımları (Cutting Parameters and Experiment Sets)

Çalışmada kesme parametrelerinin maksimum kesme sıcaklığına, ilerleme kuvvetine ve delme torkuna olan etkileri araştırılmıştır. Bunun için literatürle uyumlu olarak devir sayısı ve ilerleme hızı değerleri seçilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm deney şartları ve kesme parametreleri Çizelge 3'te verilmiştir. Her bir parametre için standart sapma ve hata değerlerini en aza indirmek

amacıyla en az üçer adet deney gerçekleştirilmiştir. Ancak literatürde hakkında fikir bütünlüğü olmayan bazı parametreler (uç açısı gibi) için deney sayısı 9'a kadar çıkartılmıştır.



Şekil 4. Ham kuvvet ve tork verileri, a) matkap ucunun kemiğe nüfuz ettiği bölge, b) delme işleminin stabil devam ettiği bölge, c) matkap ucunun kemikten ayrıldığı bölge (Raw data for force and torque, a) the region where the drill bit penetrates the bone, b) the region where the drilling process continues stable, c) the region where the drill bit exits from the bone).



Şekil 5. Deney numunesi (Test sample).

Şekil 5'de verilen kemik numunesi üzerinden periosteum adlı zar çıkartılmamıştır. Literatürde yer alan bir çalışmada [17] periosteum zarının matkap kanallarında tıkanmaya sebep olduğuna yer verilmiştir. Yapılan deneylerin gerçekliğe benzerliğinden taviz vermemek adına bu zar kemik üzerindeyken deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Deneyde kullanılan, referans ve değişken parametreler (Reference and variable parameters used in the experiment)

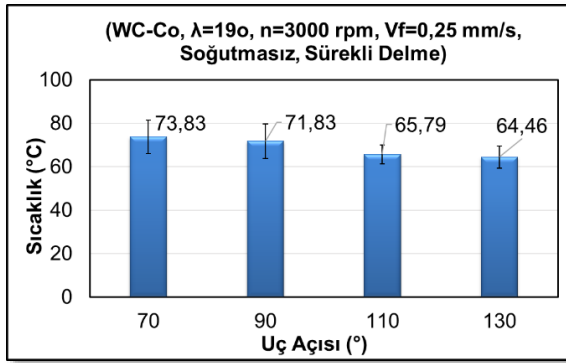
Etkisi Araştırılan Parametre	Değişken Parametreler	Referans Parametreler									
		Takım Malzemesi	Devir Sayısı n (rpm)	İlerleme Hızı V_f (mm/s)	Uç Açısı ϕ (°)	Helis Açısı λ (°)	Kesme koşulu	Delme Metodu			
Devir Sayısı n (rpm)	3000, 5000, 7500, 10000	Karbür	-	0,25	110	30	Kuru	Sürekli			
İlerleme Hızı v_f (mm/s)	0,25, 0,5, 1		-								
Uç Açısı ϕ (°)	70, 90, 110, 130		3000	0,25	-	19					
Helis Açısı λ (°)	12, 19, 30				-						
Takım Malzemesi	Karbür Paslanmaz çelik	-	Karbür	0,5	110	19	-	Sürekli Galalama			
Soğutma Metodu	Kuru Salin (damlatma) Salin (0,04 l/dk) Kuru hava (16°C) Soğuk hava (-5°C)										
Delme Yöntemi	Sürekli Galalama	Karbür					0,25			Tüm soğutma tipleri Kuru	-

Tüm parametreler için yapılan deneylerde ölçülen sonuçların aritmetik ortalamaları dikkate alınmıştır. Deneylerde delme işleminin sürekliliğinin etkisini araştırmak adına gagalama yöntemi de çalışmaya dahil edilmiştir. Çalışmanın devamında, 1 mm gagalama için Gagalama Tip-1, 2 mm gagalama için Gagalama Tip-2 olarak isimlendirilmiştir.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL FINDINGS AND DISCUSSIONS)

3.1 Uç Açısının Etkisi (Effect of Point Angle)

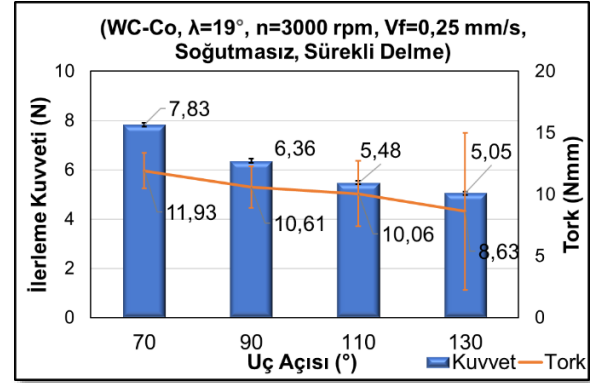
Literatürde uç açısı ile ilgili kesin bir sonuç bulunamadığı için uç açısının etkisini tespit edebilmek adına deney sayısı 9'a çıkartılmıştır. Her bir uç açısı için elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri de hata çubuğu olarak grafiğe dahil edilmiştir. Şekil 6'da matkap uç açısının sıcaklık üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Sonuçlara göre, uç açısı arttıkça kesme sırasında meydana gelen sıcaklıkta bir düşüş gözlemlenmektedir. Sonuçlar Akhbar ve Yusoff [19]'un çalışmalarında ki 70° uç açısından 130° uç açısına kadar olan sonuçlara benzerlik göstermektedir. Uç açısının artması, kesme kenarı uzunluğunun azalması anlamına gelir [32]. Daha da önemlisi, uç açısının artırılması ile birlikte, kesici ağızların kemiğe tam anlamıyla dalma süresini azalır. Bu da delme işleminin daha kısa sürede gerçekleşmesine neden olur. Sonuç olarak matkap ile kemik arasında daha az sürtünme süresi, bu da daha az ısı üretimi anlamına gelir.



Şekil 6. Matkap uç açısının sıcaklık üzerindeki etkisi (Effect of point angle on temperature).

Şekil 7'de farklı uç açılarının ilerleme kuvveti delme torku üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikte dikkat çeken unsur, uç açısı değerinin artmasıyla ilerleme kuvvetinin azalmasıdır. Fakat 90-130° arasındaki uç açılarında ilerleme kuvvetinin dalgalı bir seyir izlediği ve ortalamada da önemli bir değişimin olmadığını söylemek mümkün. Düşük değerli uç açılarında kesici kenar uzunluğunun artması ise bu süreyi artırır ve kesme işlemini güçleştirir. Bu da ilerleme kuvvetinin artmasına neden olur. Küçük uç açılı matkap uçlarında yüksek kuvvet değerlerinin görülmesine, delik çevresindeki yüksek sürtünmenin sebep olduğu düşünülmektedir [33].

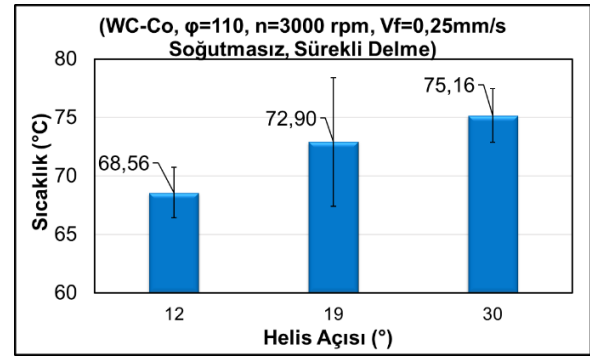
Artan uç açısı delme torkunun az da olsa düşmesine neden olmaktadır. Bir anlamda artan uç açısı delme esnasındaki harcanan enerjinin azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Matkap uç açısının ilerleme kuvveti ve delme torku üzerindeki etkileri (Effects of point angle on feed force and drilling torque).

3.2 Helis Açısının Etkisi (Effect of Helix Angle)

Şekil 8'de matkap helis açısının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Helis açısının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar Lee vd. [18]'nin çalışmalarının aksine, Akhbar ve Yusoff [19]'un çalışmaları ile benzerlik göstermektedir.

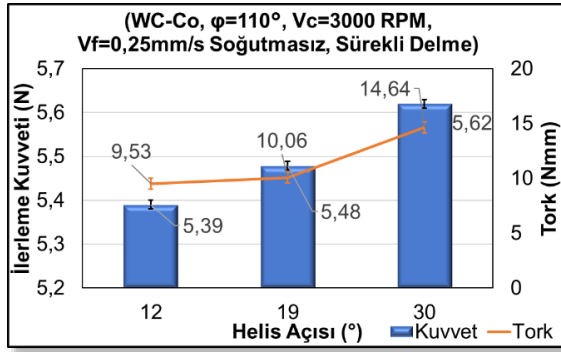


Şekil 8. Helis açısının maksimum kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi (Effects of helix angle on cutting temperature).

Bu durum, helis açısı değeri arttıkça, aynı kesme hızında matkap ucu kanalları içerisindeki ısı taşıyıcısı olan talaşların kesme bölgesini tahliye etme sürelerinin uzamasına bağlanabilir. Dolayısı ile düşük helis açısı değerine sahip matkap uçlarında kemik talaşı kesme bölgesinden daha hızlı tahliye edilirken, yüksek helis açısı değerine sahip matkap uçlarında bu tahliye süresi uzayarak talaşın üzerinde barındırdığı ısı kemik dokusuna transfer olacak süreye sahip olmaktadır.

Şekil 9'da helis açıları için hem ilerleme kuvveti hem de delme torku üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikte göre artan helis açısı torkun artmasına neden olmaktadır. 12° ve 19° helis açılarının tork değerlerinin birbirine yakınlığı göz önüne alındığında, helis açısı ile tork arasında doğrusal bir ilişki kurulabilir. Buna göre helis

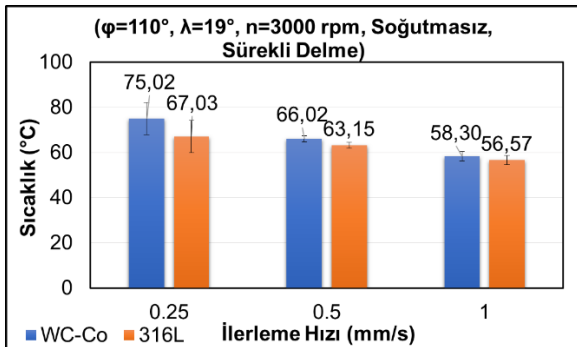
açısı arttıkça tork değerleri artış göstermektedir. Buna sebep olarak, kanal içerisinde talaş yoğunluğunun artması ve sıkışmasına bağlı olarak 30° helis açısına sahip matkap ucunda ölçülen tork, diğerlerine göre daha yüksek değerde olduğu düşünülmektedir. Şekil 10'dan da görüldüğü üzere, helis açısının artması ilerleme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. 12° ve 19° helis açısı için tork değerleri birbirine çok yakın iken, 30° helis açısı için hem kuvvet hem de tork değerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Helis açısının ilerleme kuvveti ve delme torku üzerindeki etkisi (Effect of helix angle on feed force and drilling torque).

3.3 Takım Malzemesinin Etkisi (Effect of Tool Material)

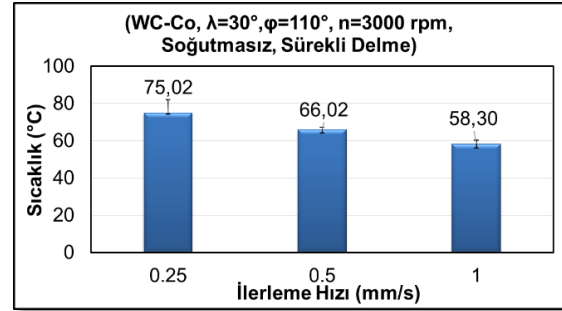
Cerrahi operasyonlarında genellikle paslanmaz çelik matkaplar kullanılırken, karbür matkapların da kullanıldığı uygulamalara rastlamak mümkün. Bu nedenle bu çalışmada her iki matkap malzemesinin hem kesme sıcaklığı hem de kuvvet ve tork açısından etkileri incelenmiştir. Şekil 10'da matkap ucu malzemesinin sıcaklık üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Sonuçlara göre, tüm ilerleme hızı değerleri için paslanmaz çelik malzemesinden üretilmiş matkap uçlarında elde edilen kesme sıcaklıkları daha düşüktür. İki malzemenin de termal iletkenlik katsayıları ve ısı kapasiteleri dikkate alındığında ($K_{316L@293K} = 13,26 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve $K_{WC-Co@273K} = 34,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [34], $C_{p316L@293K} = 452 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve $C_{pWC-Co} = 234 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [35]) AISI 316L paslanmaz çeliği, ısıyı iyi iletmediğinden ve ısı kapasitesi daha yüksek olduğundan daha az sıcaklık artışı ile daha fazla ısıyı üzerinde taşıyabilmektedir.



Şekil 10. Kesici takım malzemesinin maksimum delme sıcaklığı üzerindeki etkisi (Effect of cutting tool material on temperature).

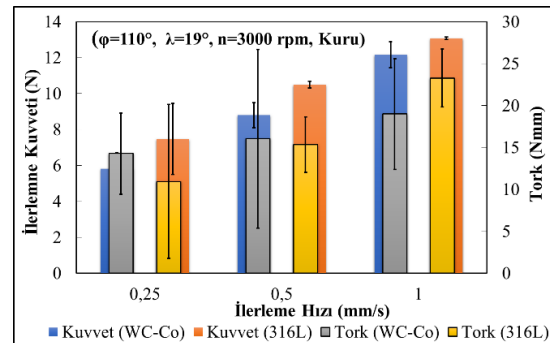
3.4 İlerleme Hızının Etkisi (Effect of Feed Rate)

Şekil 11'de ilerleme hızının maksimum kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Sonuçlara göre, ilerleme hızının artmasına bağlı olarak kesme sıcaklığı azalmaktadır. Bunun nedeni kemiğin takım malzemesine göre daha düşük bir termal iletkenlik katsayısına sahip olmasıdır. Takım ucunun daha hızlı hareket etmesi, ısının kemiğe transfer olması için gerekli sürenin kısılması anlamına gelir ki bu da kesme sıcaklığının azalmasına neden olur. Sui vd. [26]'nin geliştirdiği matematiksel model ve doğrulama deneylerinde de benzer bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 11. İlerleme hızının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri (Effects of feed rate on temperature).

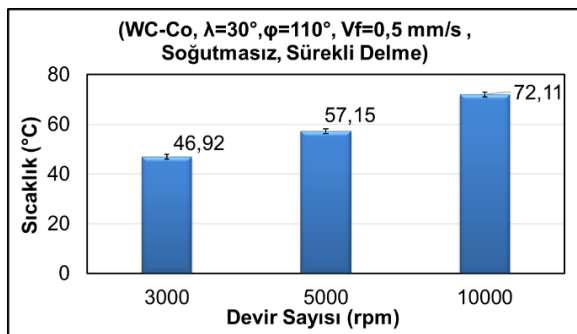
İlerleme miktarının artması birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olur. Bu da matkaba gelen yükü arttırmaktadır. Diğer taraftan, matkabin delik içerisinde ilerlemesi sırasında artan sıcaklık, sürtünme ve oluşan talaş sıkışması da bu artışa sebep gösterilebilir. Şekil 12'de matkap malzemesinin ilerleme kuvveti ve delme torku üzerindeki etkileri verilmiştir. AISI-316L matkap uçlarında ilerleme kuvvetinin bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. 0,25 mm/s ve 0,5 mm/s ilerleme hızlarında WC-Co matkap ucunda elde edilen tork değerleri nispeten daha yüksektir. Fakat 1 mm/s ilerleme hızında AISI-316L matkap malzemesindeki tork değeri daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte tork değerleri için elde edilen minimum ve maksimum değerler arasında önemli bir sapmanın olduğunu söylemekte fayda var. Kuvvet ve tork değerlerindeki artış Alam vd. [36] ve Gupta ve Pandey [37]'in çalışmalarında aldıkları sonuçlara benzerlik göstererek artan ilerleme hızı değeri ile artış göstermektedir.



Şekil 12. Kesici takım malzemesinin ilerleme kuvveti ve delme torku üzerindeki etkileri (Effects of cutting tool material on feed force and drilling torque).

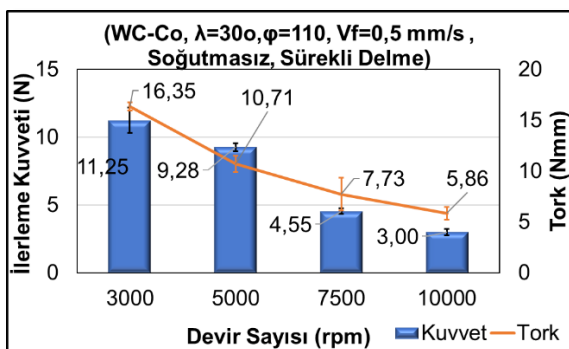
3.5 Devir Sayısının Etkisi (Effect of Number of Revolution)

Şekil 13'te devir sayısının maksimum kemik sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Sonuçlara göre, devir sayısı arttıkça maksimum kesme sıcaklığı da artmaktadır. Bu durum 1. deformasyon bölgesindeki kayma gerilme oranının artmasına, matkap ucu ile kemik arasındaki sürtünmenin artmasına ve matkap ucu üzerindeki talaş yüzeyi boyunca talaş akış hızının artmasına bağlanabilir. 10000 rpm devir sayısında $T_a=72,11$ °C olarak ölçülmüş ve 3000 rpm devir sayısında ise 46,92 °C ile en düşük değeri almıştır. Deney sonuçları Wang vd. [24]'nin çalışmalarındaki sonuçlarına benzerlik göstererek, devir sayısı arttıkça maksimum kesme sıcaklığında artış gözlemlenmektedir.



Şekil 13. Devir sayısının kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi (Effect of spindle speed on cutting temperature).

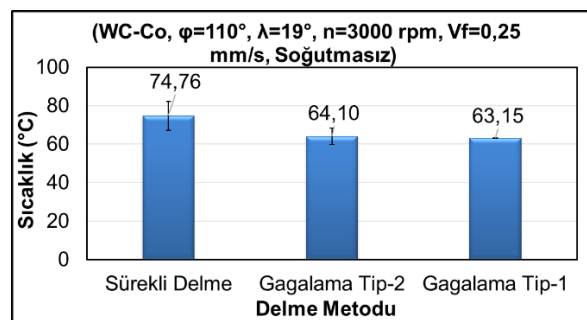
Şekil 14'te devir sayısının ilerleme kuvveti hem de delme torqu üzerindeki etkileri verilmiştir. Deney sonuçlarına göre devir sayısının artması ile ilerleme kuvvetinde düşüş gözlemlenmiştir. Kuvvet verilerindeki bu düşüş literatürde Alam vd. [38] ve Wang vd. [39]'nin çalışmalarında aldıkları sonuçlara benzerlik göstermektedir. Deney sonuçlarına göre devir sayısının artırılmasıyla kesme sırasında oluşan tork azalmaktadır. Kuvvet ve torktaki bu düşüş talaş formunun değişmesi ve tahliyesinin kolaylaşmasına bağlanmıştır.



Şekil 14. Devir sayısının ilerleme kuvveti ve delme torqu üzerindeki etkisi (Effect of the spindle speed on the feed force and delme torque)

3.6 Delme Metodunun Etkisi (Effect of Drilling Method)

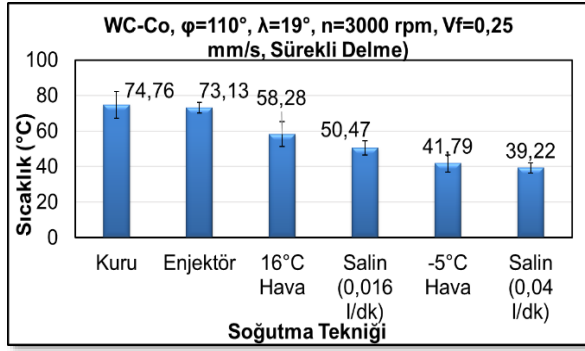
Çalışmanın bu kısmında sürekli delme ile gagalama yöntemleri de kendi arasında karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 15'te sürekli delme ve iki farklı gagalama yönteminin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi verilmiştir. Beklenildiği üzere sürekli delme işleminde kesme sıcaklığı daha yüksek elde edilmiştir. Gagalama yöntemi ile kesme sıcaklığı yaklaşık 10°C kadar azalmaktadır. Gagalama yönteminin en önemli iki avantajı vardır. Bunlar; talaş tahliyesini kolaylaştırarak sıcaklığın azalması, diğeri ise takımın belirli bir süre boşa çıkması neticesinde kısmen de olsa takım sıcaklığının azalmasıdır. Bu her iki durum nedeniyle kesici kenar bölgesindeki sıcaklık yaklaşık 10° daha düşük elde edilmiştir.



Şekil 15. Delme metodlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi (Effect of drilling methods on cutting temperature).

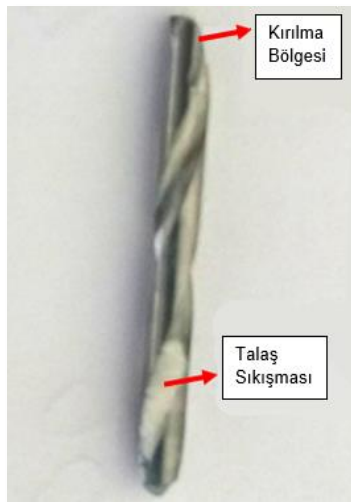
3.7 Soğutma Metodunun Etkisi (Effect of Cooling Method)

Kemik delme deneylerinde iki tip soğutucu akışkan ve her bir akışkan ile ilgili iki tip yöntem uygulanmıştır. Aynı zamanda soğutucu akışkanların kullanıldığı esnada soğutucu ve gagalamanın birlikte olan etkisini gözlemlenmek üzere gagalama metoduyla delme işlemi yapılarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sürekli delme şartlarında soğutma yöntemlerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri Şekil 16'da verilmektedir. Salin sıvısının enjektör yardımıyla damlatıldığı, damlatma tekniği ile soğutmasız delme arasında önemli bir fark görülmemiştir. Alam [38]'in bu çalışmasına benzer olarak 0,04 l/dk debi ile uygulanan 16 °C'deki salin sıvısında etkili bir soğutma sağlanmıştır. Bu şartlar altında soğutucu madde olarak salin kullanıldığında kemikte termal nekrozu indüklemeyen daha yüksek delme hızları ve ilerleme hızlarının kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



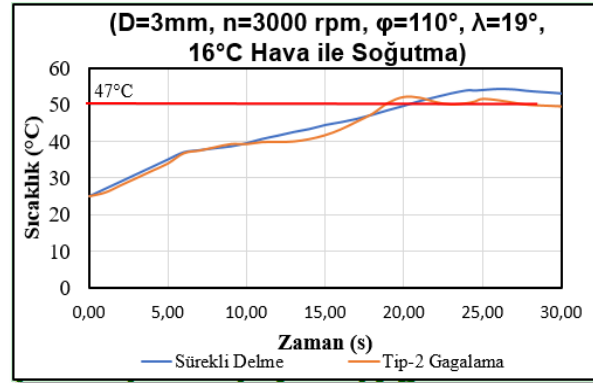
Şekil 16. Soğutma metodunun sıcaklık üzerindeki etkisi (Effect of cooling method on temperature).

Salin sıvısı ve bir gaz olan havanın soğutma sonuçları Shakouri vd. [30]'nin deney sonuçlarına benzerlik göstermiştir. Buna göre salin sıvısının sahip olduğu ısı kapasitenin yüksek olmasına rağmen havadan daha iyi olmayan bir soğutma sağlamıştır. Bunun nedeni, salin sıvısının kesme bölgesine nüfuziyetinin, gaz soğutuculara göre zayıf olmasıdır. 0,016 l/dk debi ile uygulanan salin sıvısı deneylerinde matkap kanallarının çamurlaşma sebebiyle tıkandığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple ortalama kemik sıcaklığı değerinin hata çubuğu oldukça büyüktür. Ölçülen değerler 47 °C nin oldukça üstünde olmakla birlikte literatürde bildirilen 70 °C olan kemiğin derhal hasar aldığı sınır sıcaklığa yakındır. 0,016 l/dk debi için yapılan deneylerde kullanılan matkap ucu diğer tüm deneylerin aksine kırılmıştır. Bu kırılma olayı matkap kanallarının tıkanması neticesinde artan burulma momentine atfedilmiştir (Şekil 17). Bu durum cerrahi işlemlerde de gerçekleşebileceğinden 0,016 l/dk debide salin sıvısının uygulanması önerilmemektedir. Aynı sorun ile enjektör yardımıyla uygulanan salin sıvısı durumunda da karşılaşılabılır. Damlatma yönteminde sıcaklık değeri soğutmasız delme işlemine oldukça yakın ölçülmüştür. Bu durumda en uygun sonuçlar 0,04 l/dk debi ile uygulanan salin sıvısı ve -5 °C'de uygulanan hava ile soğutma yönteminden alınmıştır.



Şekil 17. Talaş sıkışması ve matkap ucu kırılması (Chip jamming and drill bit breakage).

16°C Sıcaklıkta havanın soğutucu olarak kullanıldığı deneylerin sonuçlarına göre, sürekli delme koşullarında 58,28°C maksimum delme sıcaklığı ölçülürken, tip-2 gagalama tekniği uygulandığında 52,62°C maksimum delme sıcaklığı ölçülmüştür. Ancak bu ulaşılan yüksek sıcaklıklar delme işleminin sonlarına doğru çok kısa süreli gerçekleşmiştir. Şekil 18'deki sıcaklık grafiğinden anlaşılacağı gibi bu iki durum için kemik sıcaklığı 47°C'nin üstünde yaklaşık 13 saniye kadar kalmıştır. Bu iki uygulama nekroz şartlarından biri olan 47°C ve 1 dakika şartına uygundur.



Şekil 18. 16°C hava sürekli delme ve Tip-2 Gagalama koşullarında yapılan bir deneye ait sıcaklık-zaman grafiği (Temperature-time plot of an continuous drilling with 16°C air coolant and Type-2 Pecking conditions).

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, cerrahi kemik delme işlemleri gerçekleştirilmiş, bu deneyler için 3 mm çapında AISI 316L paslanmaz çelik ve WC-Co matkap uçları kullanılmıştır. Delik delme işlemleri yerel firmalardan ticari amaçlarla öldürülen 1 yaşındaki sığır femur kemikleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, matkap ucunun geometrisi, kesme parametreleri ve kesme koşulları değişken olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi maddelendirmek mümkündür.

- Artan uç açısı ilerleme ve torkun azalmasına neden olurken, kemik sıcaklığının da bir miktar düşmesine katkıda bulunmuştur.
- Artan helis açısı kesme sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Buna karşın azalan helis açısı tork ve kuvvet değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. 12° helis açısının kemik delme işlemleri için daha uygun olduğu söylenebilir.
- Matkap malzemesi açısından, AISI 316L düşük ilerleme hızları için daha uygun iken, yüksek ilerleme hızlarında WC-Co tercih edilebilir.
- Artan devir sayısı, kesme sıcaklığının da belirgin bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Buna karşın, artan devir sayısı ile ilerleme kuvveti ve tork azalmaktadır.

Nekroz durumu öncelikli göz önüne alındığında düşük devir sayısı tercih edilmelidir.

- Yüksek ilerleme değerlerinin kullanılması, kemiğin daha düşük sıcaklıklara daha kısa süreyle maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek ilerleme değerleri tercih edilebilir. Ancak, ilerleme kuvvetinin travma ve mikro çatlaklara sebep olabileceği unutulmamalıdır.
- Nekroz riskinin en aza indirgenmesi için gagalama yöntemi en az 0,04l/dk debiye sahip soğutma sıvısı ile birlikte uygulanmalıdır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Abdurrahman REİS: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Kubilay ASLANTAŞ: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ekrem ÖZKAYA: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kondo S., Okada Y., Iseki H., Hori T., Takakura K., Kobayashi A. and Nagata H., "Thermological Study of Drilling Bone Tissue With a High-Speed Drill", *Neurosurgery*, 46(5): 1162-1168, (2000).
- [2] Augustin G., Davilla S., Mihoci K., Udiljak T., Vedrina D.S. and Antabak A., "Thermal Osteonecrosis and Bone Drilling Parameters Revisited", *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 128(1): 71-77, (2007).
- [3] Augustin G., Zigman T., Davila S., Udiljak T., Staroveski T., Brezak D. and Babic S., "Cortical Bone Drilling and Thermal Osteonecrosis", *Clinical Biomechanics*, 27(4): 313-325, (2012).
- [4] Dolan E.B., Haugh M.G., Tallon D., Casey C. and Mcnamara L.M., "Heat-Shock-Induced Cellular Responses to Temperature Elevations Occurring During Orthopaedic Cutting", *Journal of The Royal Society Interface*, 9: 3503-3513, (2012).
- [5] Tai B.L., Palmisano A.C., Belmont B., Irwin T.A., Holmes J. and Shih A.J., "Numerical Evaluation of Sequential Bone Drilling Strategies Based on Thermal Damage", *Medical Engineering and Physics*, 37(9): 855-861, (2015).
- [6] Moritz A.R. and Henriques F.C., "Studies of Thermal Injury II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous Burns", *Am. Jo. Pathol.*, 23: 695-720, (1947).
- [7] Thompson H.C., "Effect of Drilling Into Bone", *Journal of Oral Surgery*, 16(1): 22-30, (1958).
- [8] Pallan F.G., "Histological Changes in Bone After Insertion of Skeletal Fixation Pins", *Journal of Oral Surgery*, Anesth. Hosp. Dent Serv, 18: 400-408, (1960)
- [9] Matthews L.S., Green C.A. and Goldstein S.A., "The Thermal Effects of Skeletal Fixation-Pin Insertion in Bone", *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 66: 1077-1083, (1984).
- [10] Abouzgia M.B. and James D.F., "Temperature Rise During Drilling Through Bone", *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants* 12(3): 342-353, (1997).
- [11] Hillery M.T. and Shuaib I., "Temperature Effects in the Drilling Of Human and Bovine Bone", *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93: 302-308, (1999).
- [12] Toews A.R., Bailey J.V., Townsend H.G. and Barber S.M., "Effect of Feed Rate and Drill Speed on Temperatures in Equine Cortical Bone", *American Journal of Veterinary Research*, 60(8): 942-944, (1999).
- [13] Hutchinson D.T., Bachus K.N. and Higgenbotham T., "External Fixation of the Distal Radius: To Predrill or not to Predrill", *The Journal of Hand Surgery*, 25(6): 1064-1068, (2000).
- [14] Ashford R.U., Pande K.C. and Dey A., "Current Practice Regarding Re-Use of Trauma Instrumentation: Results of a Postal Questionnaire Survey", *Injury*, 32(1): 37-40, (2001).
- [15] Garcia O.G., Mombiola F.L., Fuente C.D., Jimenez C., Aranguiz M. G., Escribano D. G. and Martin J. V., "The Influence of the Size and Condition of the Reamers on Bone Temperature During Intramedullary Reaming", *Journal of Bone and Joint Surgery*, 86, 994-999, (2004).
- [16] Kalidindi V., "Optimization of Drill Design and Coolant Systems During Dental Implant Surgery", *Masters Thesis*, University of Kentucky, Graduate School, Kentucky, (2004).
- [17] Alam K., Muhammad R., Shamsuzzoha A., Alyahmadi A. and Ahmed N., "Quantitative Analysis of Force and Torque in Bone Drilling", *The Journal of Engineering Research*, 14: 39-48, (2016).
- [18] Lee J., Rabin Y. and Ozdoganlar O.B., "A New Thermal Model for Bone Drilling With Applications to Orthopaedic Surgery", *Medical Engineering and Physics*, 33: 1234-1244, (2011).
- [19] Aliakhbar M.F. and Yusoff A.R., "Drilling of Bone: Effect of Drill Bit Geometries on Thermal Osteonecrosis Risk Regions", *Journal of Engineering in Medicine*, 095441191881911, (2018).
- [20] Fuchsberger A., "Damaging Temperature During the Machining of Bone", *Unfallchirurgie*, 14: 173-183, (1988).
- [21] Bechtol C.O., Ferguson A.B. and Laing P.G., "*Metals and Engineering In Bone and Joint Surgery*", 1st Ed., Williams and Wilkins, Baltimore, (1959).
- [22] Jacob C.H., Berry J.T., Pope M.H. and Hoaglund F. T.,

- “A Study of the Bone Machining Process-Drilling”, *Journal of Biomechanics*, 9(5): 343-349, (1976).
- [23] Farnworth G.H. and Burton J.A., “Optimization of Drill Geometry for Orthopaedic Surgery”, *14th International Machine Tool Design and Research Conference*, Manchester, England, 12-14, (1974).
- [24] Wang Y., Cao M., Zhao X., Zhu G., McClean C., Zhao Y. and Fan Y., “Experimental Investigations and Finite Element Simulation of Cutting Heat in Vibrational and Conventional Drilling of Cortical Bone”, *Medical Engineering and Physics*, 36(11): 1408-1415, (2014).
- [25] Nam O., Yu W., Choi M.Y. and Kyung H. M., “Monitoring of Bone Temperature During Osseous Preparation for Orthodontic Micro-Screw Implants: Effect of Motor Speed and Ressure”, *Key Engineering Materials*, 321-323: 1044-1047, (2006).
- [26] Sui J., Sugita N. and Mitsuishi M., “Thermal Modeling of Temperature Rise for Bone Drilling With Experimental Validation”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(6): 061008, (2015).
- [27] Abouzgia M.B. and James D.F., “Measurements of Shaft Speed While Drilling Through Bone”, *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 53(11): 1308-1315, (1995).
- [28] Costich E.R., Youngblood P.J. and Walden J.M., “A Study of the Effects of High-Speed Rotary Instruments on Bone Repair in Dogs”, *Oral Surgery Oral Medicine and Oral Pathology*, 17(5): 563-571, (1964).
- [29] Mellinger J.C., Ozdoganlar B.O., Devor R.E. and Kapoor S.G., “Modeling Chip-Evacuation Forces and Prediction of Chip-Clogging in Drilling”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(3): 605-614, (2002).
- [30] Shakouri E., Hassanalideh H.H. and Gholampour S., “Experimental Investigation of Temperature Rise in Bone Drilling with Cooling: A Comparison Between Modes of Without Cooling Internal Gas Cooling and External Liquid Cooling”, *Journal of Engineering Medicine*, 232(1): 45-53, (2017).
- [31] Staroveski T., Brezak D. and Udiljak T., “Drill Wear Monitoring in Cortical Bone Drilling”, *Medical Engineering and Physics*, 37(6): 560-566, (2015).
- [32] Soylu A., “Bir Delme Dinamometresi Tasarım ve İmalatı ile HSS-1040 Malzeme Çiftinde İlerleme Kuvveti ve Döndürme Momentinin Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [33] Wiggins K.L. and Malkin S., “Drilling of Bone”, *Journal of Biomechanics*, 9: 553-559, (1976).
- [34] Toparli M., Sen F., Culha O. and Celik E., “Thermal Stress Analysis of HVOF Sprayed WC Co/NiAl Multilayer Coatings on Stainless Steel Substrate Using Finite Element Methods”, *Journal of Materials Processing Technology*, 190: 26-32, (2007).
- [35] Umbrello D., Saoubi R.M. and Outeito J.C., “The Influence of Johnson-Cook Material Constants on Finite Element Simulation of Machining of AISI 316L Steel”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 462-470, (2007).
- [36] Alam K., Mitrofanov A.V. and Silberschmidt V.V., “Experimental Investigations of Forces and Torque in Conventional and Ultrasonically-Assisted Drilling of Cortical Bone”, *Medical Engineering and Physics*, 33: 234-239, (2011).
- [37] Gupta V. and Pandey P.M., “An in Vitro Study of Cutting Force and Torque During Rotary Ultrasonic Bone Drilling”, Proceedings of The Institution of Mechanical Enginners Part B, *Journal of Engineering Manufacture*, 232(9): 1549-1560, (2016).
- [38] Alam K., “Exploring Thermal Anisotropy of Cortical Bone Using Temperature Measurements in Drilling”, *Bio-Medical Materials and Engineering*, 27: 39-48, (2016).
- [39] Wang W., Shi Y., Yang N. and Yuan X., “Experimental Analysis of Drilling Process In Cortical Bone”, *Medical Engineering and Physics*, 36, 261