

İleri İmalat Teknolojilerinde Yeni Yaklaşım: Ultrasonik Destekli Delik Delme¹

Abdurrahman Çetin²

Sinan Serdar Özkan³

Özet

Günümüzde ileri imalat teknolojilerinin gelişimi, yüksek mukavemet, düşük ısı iletkenliği ve değişken süneklik özelliklere sahip, işlenmesi zor malzemelerin üretiminde geleneksel talaş kaldırma yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda daha etkili çözümler için yeni işleme tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu malzemelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek kesme kuvvetleri, takım aşınması, düşük yüzey pürüzlülüğü ve düşük delik kalitesi gibi sorunlar, üretim verimliliğini ve ürün performansını olumsuz etkilemektedir. Ultrasonik destekli işleme yöntemleri, delik delme ve diğer talaşlı işlemlerde yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Kesici takıma veya iş parçasına uygulanan ultrasonik titreşimlerin, kesme kuvvetlerini azalttığı, talaş kırılmasını kolaylaştırdığı, takım ömrünü uzattığı ve delik geometrisi ile yüzey kalitesinde önemli iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Böylece işlenmesi zor malzemelerde yüksek kaliteli delikler elde edilirken üretim süresi ve maliyetler de optimize edilmektedir. Ultrasonik teknolojiler, talaşlı imalatın yanı sıra havacılık, savunma, enerji, otomotiv, gıda, tekstil, sağlık ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda kesme, kaynak, temizleme, ölçme ve muayene işlemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Delik delme, frezeleme, tornalama, taşlama, honlama, raybalama ve diş çekme gibi işlemlerde ultrasonik destekli tekniklerin artan kullanımı, modern üretim sistemlerinde yüksek verimlilik, hassasiyet ve delik kalitesi sağlayan ileri bir yaklaşım olarak giderek önemini artırmaktadır.

- 1 Bu çalışma Prof. Dr. Sinan Serdar ÖZKAN danışmanlığında 22/01/2024 tarihinde tamamladığımız “Ultrasonik Delik Delme İşlemlerinde Proses Parametrelerinin İşleme Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Doktora Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2024).
- 2 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, abdurrahman@subu.edu.tr, 0000-0002-7776-8849
- 3 Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, sozkan@subu.edu.tr, 0000-0003-3509-2374

1. Delik Delme

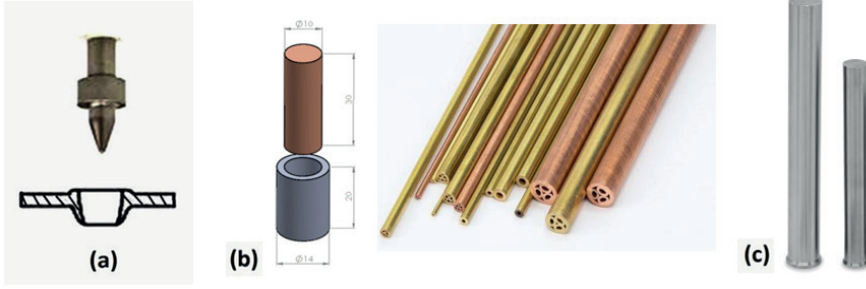
Delik delme işlemi, talaşlı imalatta yaklaşık %33 orana sahiptir (Seçgin & İ.Özsert, 2016). Özellikle havacılık gibi bazı alanlarda uçak gövdesini oluşturan parçaların %40 ile %60'ını oluşturan delme işlemi, en önemli talaş kaldırma yöntemlerinden biridir (Eltaggaz & Deiab, 2019). Delik delme için özel makina ve teçhizatlar olduğu gibi, torna ve freze tezgâhlarında da delik delme işlemleri yapılabilmektedir. Tek fark torna gibi tezgâhlarda iş parçasının dönmesiyle talaş kaldırılırken, freze ve matkap gibi tezgâhlarda kesici takımın dönmesiyle talaşın kaldırılmasıdır.

Delik delme, uygun takımlarla talaş kaldırarak ya da üretim yöntemine göre talaş kaldırmaksızın, iş parçası üzerinde genellikle dairesel açılan boşlukların genel adıdır. Talaşlı delik delme işlemlerinde malzemenin önemi olmaksızın Şekil 1.1'de görünen benzer takımlarla delik delme işlemleri kesici takımın ya da iş parçasının kendi eksenine etrafında dönmesiyle yapılabilmektedir. Talaşsız delik delme işlemlerinde ise sürtünmeli termal delik delme yöntemleri, sac-metal kalıp yöntemleri ve Elektro Erozyon İşleme (EEİ) yöntemleri geniş yer tutmaktadır. Talaşlı delik delme yöntemlerinde olduğu gibi, malzemenin önemi olmaksızın sürtünmeli termal delik delme işlemlerinde de dış formunda değiştirecek şekilde rahatlıkla Şekil 1.2a'daki takımlarla kalınlığı belli olan malzemeye delikler delinebilmektedir.



Şekil 1.1: Talaşlı delik delme kesici takımları

Fakat EEİ ile delik delme işleminde, delinmesi gereken malzemenin elektrik iletkenliği özelliğine sahip olması gerekmektedir. Diğer yöntemlere göre EEİ'de delik delme işlemi daha uzun sürmektedir. EEİ'de aslında esas gaye delik delme üzerine değildir. Bir başka deyişle esas amaç elektrotun şeklini iş parçasına aktarmaktır. EEİ'nin çalışma prensibine uygun bir diğer yöntem ise hızlı delik delme yöntemidir. Bu uygulama ile sertleştirilmiş kalınlığı çok fazla ve elektrik iletkenliği olan malzemelere diğer tüm yöntemlerden çok daha kısa sürede delme işlemi yapmak mümkündür.

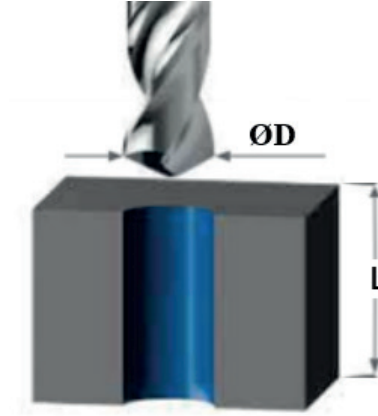


Şekil 1.2: Talaşsız delik delme takımları (a-Sürtünmeli Termal delik delme takımı, b-Elektrot, c- Kalıp delme zımbası)

Talaşlı delik delme işlemlerinde malzemenin sertliğin artması işleme esnasında çeşitli zorluklara sebep olurken EEİ yöntemlerinde ise delinmek istenen malzemenin sertliğinin önemi yoktur. EEİ yöntemlerinde kullanılan takımların temsili örnek elektrotları Şekil 1.2b’de görünmektedir. Şekil 1.2c’de de sac-levha şeklindeki seri imalat ile üretilmek istenen ve üzerinde delik vb boşluk bulunan şerit halindeki parçaların sac metal kalıpları ile üretiminde kullanılan delme-kesme zımbası gösterilmiştir.

İş parçası üzerinden boydan boya ya da kör delik şekilde boşaltmalar olabilir. Bu delikler doğrudan delinebildiği gibi, punta matkabı vb. kesici takımlarla ön delik delinmesinin ardından gerçekleştirilebilir. İlk delik delme sonrasında, kademeli başka bir delik delme işlemi, raybalama, broşlama, havşa açma, parlatma hatta honlama imalat tekniğinin kullanıldığı yöntemlerle ikinci işlemlere tabi tutulabilir. Bütün bu işlemlerin ortak noktası, iş parçası (torna tezgâhında) ya da kesici takımdan (freze tezgâhında) birinin ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle beraber yapılmasıdır. Delik delme işlemlerinde, proses parametrelerinin ve delme koşullarının yanında Şekil 1.3’de gösterilen delik çapı ($\varnothing D$) ve (L) delik derinliği de önemli bir husustur (Biermann ve diğ., 2018). $L/\varnothing D$ oranına göre delikler, kısa delik ($L/\varnothing D \leq 3$), normal delik ($3 < L/\varnothing D < 10$), derin delik ($10 \leq L/\varnothing D$) olarak sınıflandırılmaktadır. Bazı literatür çalışmalarında da ise $L/D \geq 5$ oranının üzerinde talaş tahliyesinin giderek zorlaştığı ve derin delik olarak tanımlandığı ifade edilmektedir.

Delik delme işlemi tornalama, taşlama ve frezeleme gibi diğer açık kesme işlemleriyle karşılaştırıldığında, kötü talaş tahliyesi ve talaş sıkışması gibi ciddi sorunlarla karşı karşıyadır ve bu nedenle en karmaşık ve zorlu metal kesme işlemleri olarak kabul edilir (Hoang ve diğ., 2022).

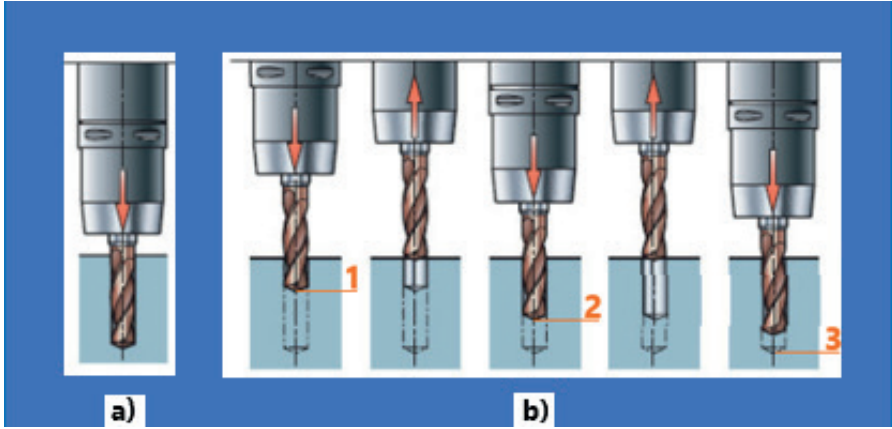


Şekil 1.3: Delik çapı ve delik derinliğinin şematik görünümü

Delme işlemi, talaş kaldırma işlemlerinin genel olarak yaklaşık %33, havacılık gibi bazı alanlarda ise %40 ile %60 arasında bir orana sahiptir (Bayraktar ve diğ., 2017; Eltaggaz & Deiab, 2019; Seçgin & İ.Özsert, 2016). İşleme zamanı olarak değerlendirildiğinde, talaş kaldırma operasyonları arasında delik delmenin, 1994'dan beridir birçok çalışmada toplam sürenin %25'ini oluşturduğu ısrarla belirtilmektedir.

Delme işleminde matkabın ağız sayısına göre her kesici kenar, kesim esnasında malzeme ile temas halindedir. Delme sırasında ortaya çıkan kuvvetler kesici takımın (matkap) aşınmasına ya da kırılmasına sebep olabilir. Delme operasyonlarında kesme derinliği arttıkça talaşın ortamdaki uzaklaştırılması ve tahliyesi zorlaşır. Bu problemleri azaltmak için endüstride gagalama ya da kademeli delik delme yöntemi kullanılabilir. Delik delme esnasında Şekil 1.4'de görünen direkt (doğrudan) delme ve gagalama (kademeli) delme olarak iki uygulanan yöntem bulunmaktadır.

Şekil 1.4'a da görüldüğü üzere doğrudan delmede, matkap iş parçasını tek adımda deler. Doğrudan delme, işleme süresini azaltır ancak doğrudan delmede talaş tahliyesi sorun olmaya başlar ve artan kesici takım ve talaş temas süresi daha fazla sürtünmeye ve takım aşınmasına sebep olabilir. İyi bir soğutma bu süreçte önem arz etmektedir. Aksi takdirde aşırı takım aşınması, düşük boyutsal hassasiyete, yüzey pürüzlülüğüne ve takımın kırılmasına neden olur. Bu nedenle doğrudan delme, genel delme için mükemmel bir çözüm değildir.



Şekil 1.4: Delme yöntemi a) Direkt delme b) Gagalama delme (Mihail, 2013)

Doğrudan delme ile ilgili sorunlardan kaçınmak için Şekil 1.4b’de gösterilen kademeli ya da gagalama delme yöntemi kullanılır. Gagalamalı delmede, matkap ucu iş parçasını birkaç adımda deler. Endüstride gagalı delme en yaygın yöntemdir. Delme derinliğine göre gagalama sayısı artmaktadır. Kademeli delme, talaşların açılan delikten çıkarılmasını doğrudan delmeye göre daha basit hale getirir. Kademeli delme, aynı zamanda delik işleme işlemi sırasında oluşan tork ve itme kuvvetini azaltmaktadır. Özellikle derin delik delme işlemlerinde, kesici takımın kırılmasını önlemek ve daha iyi yüzey kalitesi için gagalama delme tercih edilmektedir. Kademeli delik delme parametreleri uygun seçilmelidir aksi takdirde direkt derin delik delme işlemine göre daha olumsuz sonuçlara da neden olabilir (Enis, 2023).

1.1. Ultrasonik Delik Delme (UDD)

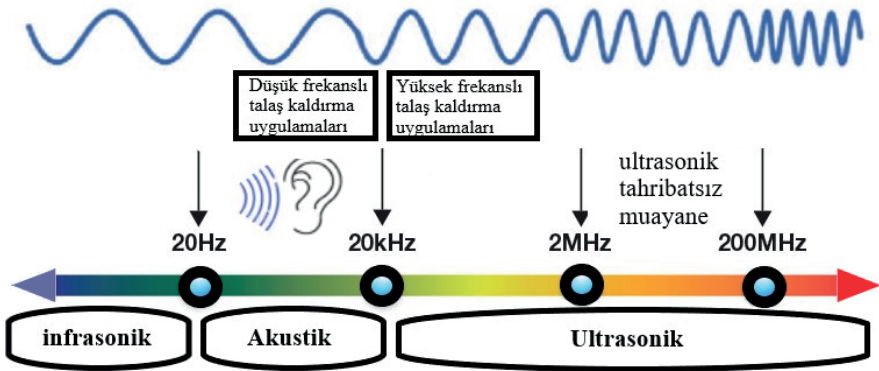
Kesme hızı ve ilerleme parametrelerine bağlı olan delme, tornalama, frezeleme vb. imalat yöntemlerine geleneksel talaş kaldırma yöntemleri denilmektedir. Ultrasonik delik delme işlemi, geleneksel delik delme yönteminde bulunan kesme hızı, ilerleme gibi işleme parametrelerine ilave olarak frekans ve genlik parametrelerinin de eklenmesi ile gerçekleşmektedir.

Şekil 1.5’de görüldüğü üzere insan işitme aralığı yaklaşık 20 Hz ila ~20 kHz arasındadır. “Ultrason” ise, bu frekans aralığının üzerindeki ses dalgaları anlamına gelmektedir (Tobergte & Curtis, 2011). Grafikte, ses dalgalarının frekans aralıklarına göre sınıflandırılması ve bu frekans aralıklarının endüstriyel uygulama alanları gösterilmektedir. Ses dalgaları, titreşim frekans aralıklarına göre infrasonik, akustik ve ultrasonik olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır.

İnfrasonik bölge, 20 Hz'in altında yer almakta olup insan kulağının duyma sınırının altındaki düşük frekanslı titreşimleri kapsamaktadır. Bu aralıkta yer alan titreşimler genellikle doğadaki büyük ölçekli olayların (örneğin deprem ya da volkanik hareketler) izlenmesinde, titreşim analizlerinde ve bazı özel endüstriyel proseslerde kullanılmaktadır.

Akustik bölge, yaklaşık 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekans aralığını kapsar ve insan kulağının duyabildiği sesleri içerir. Bu bölge, ses mühendisliği, akustik ölçümler ve müzik teknolojilerinin yanı sıra, düşük frekanslı titreşimlerle desteklenen talaş kaldırma işlemlerinde de uygulama alanı bulmaktadır.

Ultrasonik bölge ise 20 kHz'in üzerindeki frekans aralığını kapsar ve insan kulağının algılama sınırının ötesindedir. Bu bölgede titreşim genliği küçük ancak frekans yüksek olduğundan, enerji aktarımı oldukça hassas ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ultrasonik frekanslar, özellikle yüksek frekanslı talaş kaldırma uygulamalarında, ultrasonik kaynakta, temizleme işlemlerinde ve malzemelerin mikroyapısal muayenesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık 20 kHz – 2 MHz aralığı, ultrasonik destekli işleme teknikleri (örneğin ultrasonik delme, frezeleme veya taşlama) için tercih edilirken, 2 MHz ile 200 MHz arasındaki yüksek frekanslar tahribatsız muayene (NDT) uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda ultrasonik dalgalar, malzeme içinden geçerek yansımalar oluşturur ve bu yansımalar sayesinde iç kusurların, çatlakların veya boşlukların tespiti mümkün olur.



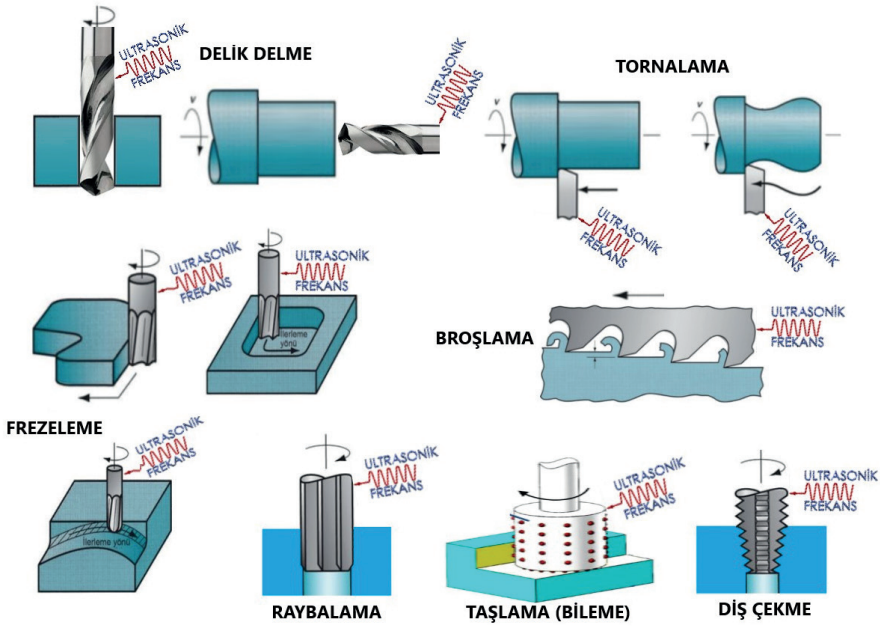
Şekil 1.5: Frekans aralıkları

Ultrason, insan duyma frekansının üzerinde olmasına rağmen, çok karmaşık menzil, konum bulma, hedef belirleme ve iletişim kurma

gibi amaçlar için bazı hayvanlar tarafından milyonlarca yıldır doğada uygulanmaktadır. 19. yüzyıldan önce, yüksek frekanslı uygulamalara örnek çalışmalar görülmüştür. 24 kHz'e kadar çalışan ilk ultrasonik jeneratör Savart çarkı, 1830'da Fransız fizikçi Felix Savart tarafından tasarlanmıştır. Ultrasonik yöntemin ortaya çıkmasını sağlayan en önemli keşiflerden biri piezoelektriktir. 1880'de Pierre ve Paul-Jacques Curie bir elektrik sinyali mekanik bir sinyale dönüştürmeyi başardılar fakat on yıllar içinde üzerine çok fazla çalışma yapılmadığı literatüre bakıldığında anlaşılmaktadır (Lucas ve diğ., 2008; MacBeath, 2006).

Piezoelektrikğin keşfinden sonra Jacques Curie'nun eşi olan Marie Curie öncülüğünde 1800'lü yılların son çeyreğinde cerrahi alanında çalışmalar yapılmıştır ve adına da piezocerrahi denilmiştir (Pavliková ve diğ., 2011). Markov çalışmalarında titreşimli takımlarla ilgili çalışmalarının 1910 yılına kadar uzanabileceğini belirtmektedir. İleri ki yıllarda Wood ve Loomis, 1927'de ultrasoniklerin delme-kesme etkisini keşfedecek konuma gelmiştir. Markov 1962 de, işlenebilirliği zor malzemelerin ultrasonik işlenmesi konulu çalışmasında, ve 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında düşük frekanslı işleme üzerine bir dizi çalışmaların yapıldığına dikkat çeker. Ancak yine Markov'dan, literatüre sayısız katkı ile talaş kaldırma işleminde ultrasonik uygulama üzerine 1957 çalışmasına dikkat çekilmiştir (Short & Graff, 2015).

Ultrasonik delik delme yöntemi geleneksel delme ile karşılaştırıldığında, delme esnasında kesme kuvvetleri ve tork açısından bir azalmaya neden olduğu, kesici takım aşınmasının daha az olduğu ve takım ömrünün uzadığı ayrıca delik kalitesi yönünden daha fazla avantaj sağlamaktadır (Azarhoushang & Akbari, 2007; Dassow, 2018). Ultrasonik yönteminin tercih edilmesi sonrası elde edilen bu iyileşmeler, proses parametrelerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Bu nedenle, parametreleri mümkün olduğunca optimum tutmak veya her malzemeye uygun parametrelerin seçimini gerçekleştirmek, delme koşullarını belirlemek GDD ve UDD'yi karşılaştırırken önemlidir. Talaşlı imalat alanında uygulanan ultrasonik yöntemler Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6: Ultrasonik talaşlı imalat yöntemleri

Ultrasonik titreşim destekli kesme, günümüzde geleneksel olmayan üretim sürecidir. Kesici takımın, μm değerinde küçük bir genlikle ve kHz değerinde yüksek bir frekansta titreşmeye zorlandığında kesme işlemi yapar. UDD işlemi, delme koşullarını ve üretkenliği iyileştirmek için matkap ucuna veya iş parçasına besleme yönünde 2–20 μm genliklerde yüksek frekanslı titreşimler ($>20\text{kHz}$) uygulayan bir teknolojidir (M. A. Moghaddas, 2021).

Ultrasonik titreşim destekli kesme işleminin temel özelliği, kesici takım ile iş parçası arasında kesik aralıklarla temas sağlamak için kesici takım ucunda kHz cinsinden yüksek frekanslı titreşim oluşturmaktır (Gao, 2020).

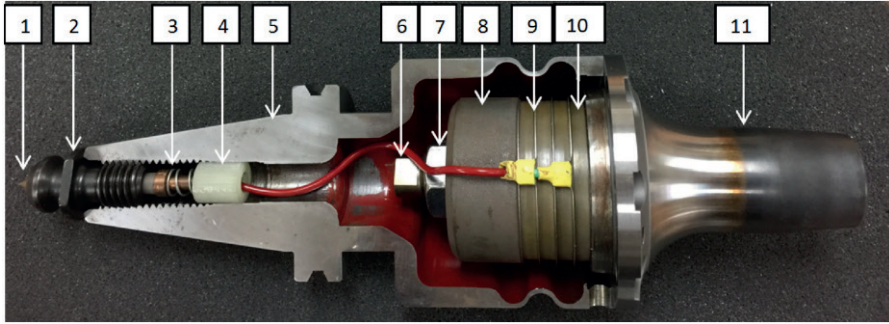
Ultrasonik titreşim destekli kesimde, istenen frekans ve genliklerde titreşimleri sağlamak için Şekil 1.7'deki gibi gösterilen benzer ultrasonik jeneratörlerden faydalanılmaktadır.



Şekil 1.7: Ultrasonik jeneratörler

Farklı işleme prosesleri için çeşitli ultrasonik titreşim destekli kesici takımlar geliştirilmiştir. Ultrasonik yöntem ile işleme, ilk önceleri tek eksenli titreşimli sonra iki boyutlu eliptik titreşim sistemleri ile geliştirilmiştir. Ultrasonik titreşim desteği, daha düşük karmaşıklığa sahip titreşimli takım tasarımları nedeniyle ilk olarak sabit bir kesici takım gerektiren tornalama operasyonlarında uygulanmıştır (Azarhoushang & Akbari, 2007; Babitsky ve diğ., 2004; Nath ve diğ., 2007). Daha sonra, iki boyutlu eliptik titreşimli işleme operasyonlarında da ultrasonik uygulamalar başlanmıştır. Ultrasonik alanındaki gelişmeler fener miline titreşim veren uygulamalara kadar ilerlemiştir. Fakat henüz yaygınlaşmamıştır. Tornalama işleminde kesici takıma titreşim uygulamak kolay bir süreçtir. Fakat frezeleme gibi özel delik delme tezgâhları gibi kesici takımın döndüğü uygulamalarda ultrasonik titreşim vermek biraz zordur.

Acoustech Systems tarafından geliştirilen tek eksen titreşim sunan kesici takım tutucusunun kesit görünümü Şekil 1.8'de verilmiştir.

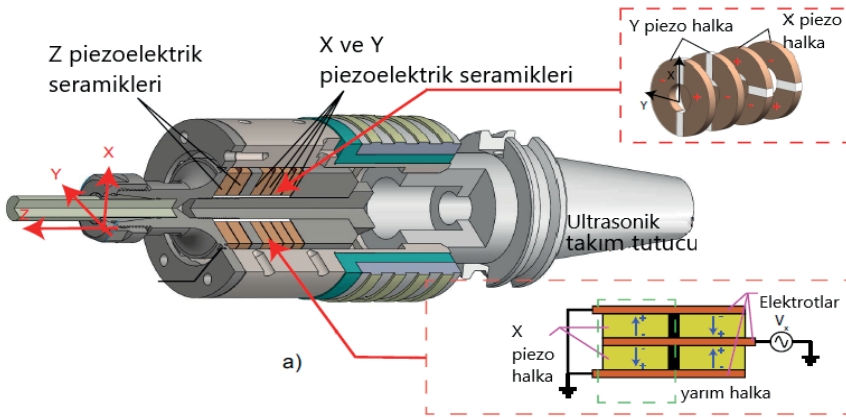


Şekil 1.8: Ultrasonik takım tutucusunun kesit görünümü(M. A. Moghaddas ve diğ., 2018a)

Şekil 1.8'e göre kesici takım, (11) horn kısmına bağlanır ve sistem çalıştığında titreşime uğrar. Sistemin çalışması için, yaylı elektrot düzeneği (3-4), bakır elektrot (1) ile tutma somunu (2) arasında bağlantı sağlanmalıdır. 5 numaralı olarak gösterilen çelik konik gövde, standart fener mili olan CNC dik işleme merkezlerinin BT, HSK ve CAT montaj sistemlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Jeneratör ile bağlantının ardından Z eksen yönünde titreşim sağlanmış olmaktadır.

Gao tarafından, XYZ eksenlerinde titreşim oluşturan ve Şekil 1.9'da görülen ultrasonik takım tutucu geliştirilmiştir. Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebildikleri gibi, elektrik enerjisini de mekanik enerjiye çevirebilirler. X ve Y eksen yönünde titreşimi sağlamak

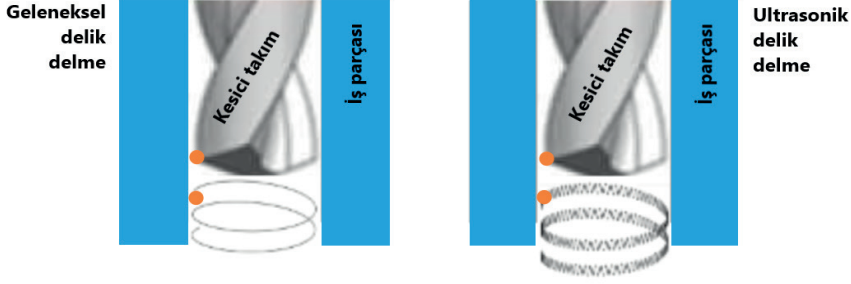
için 90 derece döndürülmüş yarım piezoelektrik seramik halkalardan faydalanılmıştır. Her bir yarım halka zıt kutuplara sahiptir ve birleştirilmiş halka seti, AC voltajı sağlamak için üst ve alt yüzeyde tam halkalı bir bakır elektrot ile kaplanmıştır. Her bir yarım halkanın polaritesi kalınlık yönü boyunca zıt olduğundan, üç elektrottan voltaj uygulandığında bir yarım halka seti genişler ve diğer halka seti daralır, böylece takım tutucunun X veya Y yönde titreşimi gerçekleşir. Her yönün titreşimi, eliptik titreşimler oluşturmak için aynı frekansta bağımsız olarak uyarılır.



Şekil 1.9:Üç eksenli ultrasonik takım tutucu (Gao, 2020)

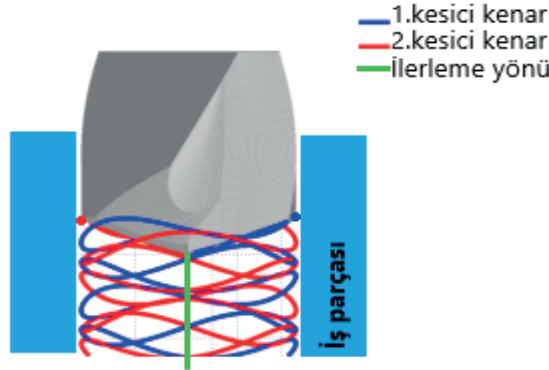
Geliştirilen ultrasonik takım tutucu ile, frezeleme uygulamaları için XY düzleminde titreşimler oluşturulurken, delme uygulamaları için de Z eksen boyuncası titreşimler oluşturabilir. Üç grup piezoelektrik halkaya sahip takım tutucu, üç eksen boyunca titreşim oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Ultrasonik titreşim jeneratörlerinin doğal frekansları, işleme sırasında kesme kuvveti bozukluklarından etkilenecek şekilde değişebilir. Bu da titreşim genlikleri üzerinde sapmalara yol açabilir (Gao, 2020).

Ultrasonik delik delme ile geleneksel delik delme yöntemlerinde takım yolları farklılık göstermektedir. Her ne kadar dışarıdan bakıldığında kesici takımın sadece Z yönünde hareket ettiği görünmüş olsa da kesici takımın üzerinde herhangi bir noktanın izlediği yol tamamen farklılık göstermektedir. Şekil 1.10'da geleneksel delik delme ile ultrasonik delik delme yönteminde kesici takım üzerindeki turuncu renk ile belirtilen noktanın gerçekleşen takım yolları gösterilmiştir.



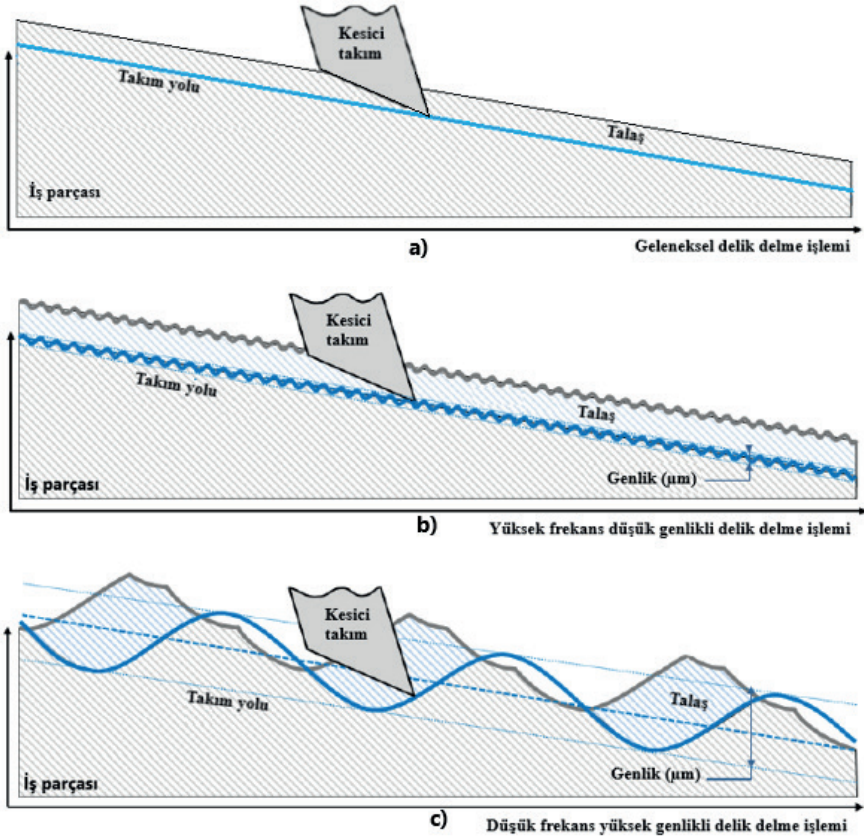
Şekil 1.10: Kesici takım üzerindeki bir noktanın delme sırasındaki takım yolu

Şekil 1.11’de mavi renkte 1 numaralı kesici kenarın dış ucunda bulunan noktanın üç boyutlu yörüngesini, kırmızı renkte 2 numaralı kesici kenarın ucunun yörüngesini ve yeşil renkte kesici takımın ekseninin ilerleme yönü görülmektedir. Kesme hızı, ilerleme, frekans ve genliğe bağlı kesici takımın talaş kaldırma esnasındaki boşluktaki hareketinin şeması büyütülerek şekilde daha açıklayıcı olarak gösterilmiştir. Ultrasonik delik delme ile kesici takıma yüksek frekans düşük genlik ile titreşim verilmektedir. Bir de düşük frekans ve yüksek genlik ile titreşimin verildiği delik delme uygulamaları da bulunmaktadır. Geleneksel delik delme Şekil 1.12a, yüksek frekanslı düşük genlikli delme işlemi Şekil 1.12b’de ve düşük frekanslı yüksek genlikli delik delme yöntemlerinde de kesici takımın izlediği yolun açılımını ise Şekil 1.12c’de verilmiştir.



Şekil 1.11: İki kesici kenar ucunun UDD’deki yörüngesi

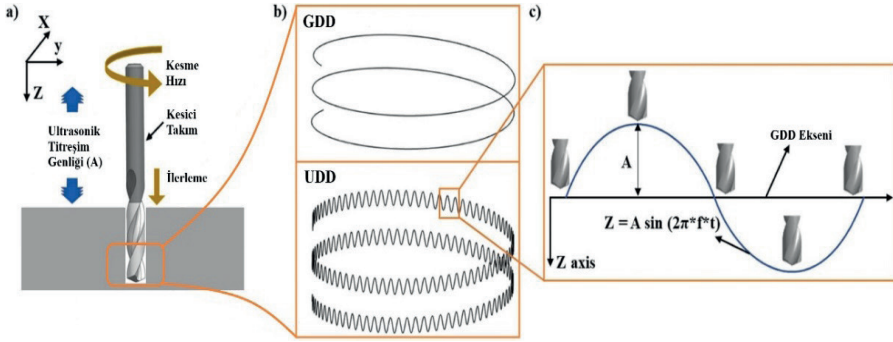
Buna göre GDD'de gagalama olmadığı sürece sürekli talaş kaldırma söz konusudur. Titreşim destekli delmeye iki şekilde yaklaşılabilir. Bu durumda düşük genlikli, yüksek frekanslı titreşimlerin olduğu delmede aralıklı temas nedeniyle talaş kırılmalar gerçekleşebilir. Düşük frekanslı yüksek genlikli titreşimli delmede ise, süreksiz bir delme işlemi görülür. Düşük frekanslı yüksek genlikli uygulamalarda titreşimi oluşturmak için dişliler veya kamların kullanıldığı mekanik çözümler de vardır (Nordenholm, 2020).



Şekil 1.12: Kesici takım üzerindeki bir noktanın delme sırasındaki takım yolunun açımını a) GDD, b)Yüksek frekans düşük genlik, c) Düşük frekans yüksek genlik (Ladonne, 2016)

Ultrasonik delik delme esnasında Z eksenı boyunca frekansa ve genliğe bağılı titreşim, kesme hızı ve ilerleme açısından üç hareket tipi Şekil 1.13a'da gösterilmektedir. Şekil 1.13b'de geleneksel delik delme ile ve ultrasonik delik delme arasındaki matkap ucunun kesme kenarındaki bir noktanın izlediği takım yolu arasındaki fark görülmektedir. GDD'de, kesici takım ve iş parçası

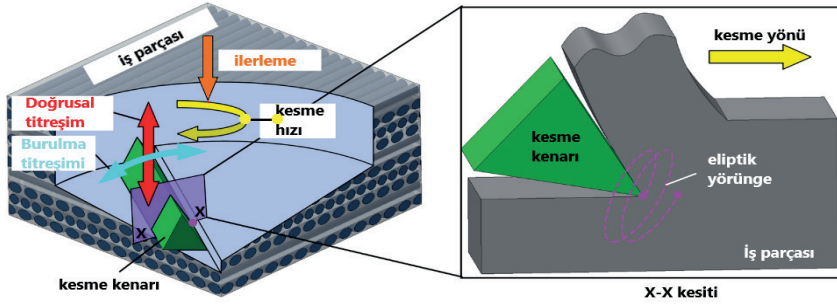
sürekli temas halinde olduğundan kesmeyi sürekli kılarken, ultrasonik delme sırasında, belirlenen işleme parametrelerine bağlı olarak, temas süreksiz olabilir ve takım titreşiminin bir sonucu olarak kesmeyi aralıklı hale getirir. Ayrıca kesici takımın kesme esnasında yörüngesi Şekil 1.13c'de verilmiştir. Burada A titreşim genliği, f titreşim frekansı ve Z takımın eksenel yönde yer değiştirmesi olarak ifade edebiliriz. İş parçasının sabit tutulduğu matkap ucuna ultrasonik titreşimin ve doğrusal ilerlemenin verildiği ultrasonik delik delme işleminin yanı sıra geleneksel yöntemlere sadece delinecek malzemelere titreşimin verildiği ultrasonik yöntemlerde bulunmaktadır. Fakat iş parçasının ultrasonik titreşim verildiği durumların uygulaması kolay verimi düşüktür.



Şekil 1.13: (a) Ultrasonik delme işlemi; (b) Geleneksel ve ultrasonik delme sırasındaki kesme yolları; (c) Delme yörüngesi (Tamil Alagan ve diğ., 2023)

UDD'de ayrıca delme yönündeki titreşime ilave olarak dönme yönünde de burulma titreşiminin uygulandığı yöntemlerde bulunmaktadır. Bu uygulamalarda kesici takımın kesme kenarındaki bir nokta Şekil 1.14'de görüldüğü gibi eliptik yörüngede hareket etmektedir. Ana kesme kenarının herhangi bir noktasındaki burulma hızı, matkap ucunun merkezine olan uzaklığıyla orantılıdır. Matkap ucunun dış köşesi, ana kesici kenar ile küçük kesici kenarın kesişimi olarak tanımlanır. Matkap ucunun merkezine olan mesafesi, matkap ucunun yarıçapına eşittir, dolayısıyla maksimum burulma hızına sahiptir (Ma ve diğ., 2022).

UDD, matkap ile iş parçası arasındaki hareket modunu değiştirdiğinden, GDD'nin sürekli kesimi, aralıklı kesmeye dönüşür. Gerçek kesme hızı ve gerçek kesme açısı periyodik olarak değiştirilir. Takım ile talaş arasındaki sürtünme faktörü azalır ve ardından sürtünme önleyici etki oluşur; Titreşimin neden olduğu dinamik kesme kuvveti bileşeni, talaş kaldırma konusunda kesici takıma avantaj sağlar. Sonuç olarak ortalama itme kuvveti ve tork azalır; Matkap ucundaki titreşim, delme performansını artırmada önemli bir faktör olarak ortaya çıkar (Wang ve diğ., 2023).



Şekil 1.14: Ultrasonik delik delmede dönme ve ilerleme yönündeki titreşim (Ma ve diğ., 2022).

1.2. Delik kalitesi

Günümüzün yoğun rekabet ortamında kâr elde ederek işletmelerin varlığını devam ettirmesi her alandaki üretim ve imalat faaliyetleri için önem arz etmektedir. Bu durumun sağlanması kalite kontrol süreçlerinin doğru işletilmesiyle birlikte istenen kaliteye tek seferde ulaşarak maliyetleri düşürmek ile mümkündür. Talaşlı imalatta istenilen delik kalitesine ulaşmak için uygun işleme yöntemini, kesici takımı, proses parametrelerini, işleme koşullarını ve kalite kontrol süreçlerini belirlemek önemlidir. Bu tezde delik kalitesinin özellikleri, Şekil 1.15’de görüldüğü gibi delik boyutu, dairesellik, silindiriklik, yüzey pürüzlülüğü, delik giriş ve çıkışlarında görülen çapak miktarını kapsamaktadır.



Şekil 1.15: Delik kalitesinin özellikleri

İşlenen deliklerin büyük oranda kalite kontrolden geçmemesinin sebeplerinin başında kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmayan boyutsal ölçüler, şekil-konum toleransları ve yüzey pürüzlülüğünün istenen kalitede olmamasıdır. Tekrar tekrar işlemeye gerek duymadan ilk defa da istenen delik kalitesini yakalamak hem ekonomik, hem zaman, hem de seri üretim açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle delik kalitesi; delik boyutu, dairesellik, silindiriklik ya da eksenel kaçıklık, yüzey pürüzlülüğü ve çapak şeklinde başlıklara ayrılabiliriz.

1.2.1. Delik Boyutu

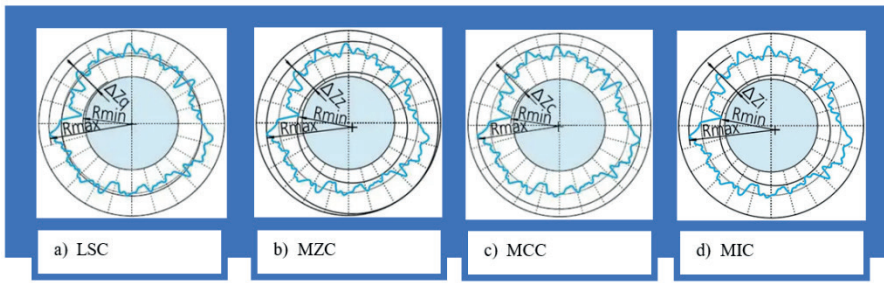
Bu tezde işlenen malzemelerde (AL7075 ve Ti6Al4V) boydan boya delik delindiği için delik boyutu kavramı, delik çapı üzerinden açıklanacaktır. Delik çapı, delik kalitesini tanımlayan en önemli konu başlığıdır. Kesici takımın, serbest yüzey aşınması, krater aşınması, çentik aşınması, talaş yığılması, plastik deformasyon, termal çatlaklar ve kenar tanecik kırılması gibi aşınma tiplerinden herhangi birine sahip olması kesme performansını etkilemektedir. Bu sebeplerle kesici takım aşınması delik çapını doğrudan etkilemektedir. Delik çapını etkileyen diğer sebep ise; delme esnasında ortaya çıkan kesme sıcaklığıdır. Kuru ya da ıslak delme koşulları ve buna bağlı olarak soğutma yöntemleri de etkilidir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün ölçülen değerleri ve delik yüzeyinde oluşan hasarlarda delik çapını doğrudan etkilemektedir. Delik çapında hata ve sapma, delme sırasında kesici takımın kayması, artan takım aşınması, kesici kenarlara yapışan malzeme ve yanlış parametre seçimleri ile oluşabilir (Dahnel, 2017). Delinen malzemeye bağlı olarak bazı durumlarda kesici takım çaplarından daha küçük delik çapı ya da daha büyük delik çapı ile karşılaşılabilir. Delik çapının kesici takım çapından küçük olduğu durumlar genellikle ısıl genleşme katsayılarının farkında dolayı kompozit malzemelerin delinmesinde yaygın olarak görülmektedir. Delik çapının küçük çıkması kesici takımın aşınması ile açıklanabilirken delik çapının büyük çıkmasının birden fazla sebebi bulunmaktadır. Bunların başında kesme hızının yüksek seçilmesi gelmektedir. Küçük delik çaplarının bir başka delik delme işlemiyle ya da raybalama işlemiyle istenen delik çapını yakalaması mümkünken, büyük delik çaplarında bu mümkün değildir. Ancak tolerans dahilinde ise kabul edilebilir olarak görülmektedir. Birbiri ile çalışan parçalar üzerindeki delikler standartlarda belirtilen istenen delik-mil toleransları tablolarındaki değerlere uygun olmalıdır.

1.2.2. Dairesellik

Delme uygulamalarında delik çapındaki değişimler kadar önemli bir diğer delik kalitesi göstergesi dairesellik değerleridir. Deliklerin istenen boyut

ölçülerinden sapması, dairesellik en az yüzey pürüzlülüğü kadar önemlidir. Delğin kalitesi açısından tüm değerlerinin tolerans dahilinde olması birbiri ile çalışan çoklu montaj uygulamaları için ayrıca önem taşımaktadır. Genel olarak delikler boyutsal ölçü tamlığı ve dairesellik açısından ikinci bir işlem olan raybalamaya ihtiyaç duymaktadır. Matkap ile delik açma işlemlerinde iki ağızlı kesici takımlar kullanılmaktadır. Raybalama işleminde ise, çok sayıda kesici ağız sayesinde, düşük miktardaki talaş yükü birçok ağız tarafından kaldırılmaktadır. Bu durum, ağız başına düşen yüklerin çok daha az olması ile birlikte istenen çap ölçüsü ve dairesellik toleranslarının elde edilmesine neden olmaktadır (Aamir ve diğ., 2020; Yılmaz, 2022).

Dairesellikten sapmanın uluslararası kabul görmüş en küçük kareler çember metodu (LSC), minimum aralıklı çemberler metodu (MZC), minimum dış çember metodu (MCC), maksimum iç çember metodu (MIC) ve olmak üzere bu dört yöntem Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16: Dairesellikten sapma yöntemleri (<https://www.machinemfg.com/roundness/>, 2023)

En küçük kareler çember metodu (LSC) en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde göre, radyal yöndeki sapmaların kareler toplamı minimum olacak şekilde delik profilini içten ve dıştan saran iki çember kullanılmaktadır. İki çember arasındaki ΔZ_q sapma ise yuvarlıktan sapma değerini vermektedir. İkinci olarak, minimum aralıklı çemberler metodu (MZC) ile delik profiline çizilen minimum yarıçaplı iki eş merkezli çember arasındaki ΔZ_z ile sapma değeri bulunmaktadır. Diğer yöntem olan minimum dış çember metodu (MCC) ise delik profiline çizilen en küçük yarıçaplı çember ile yine delik profiline en büyük yarıçaplı çizilen çemberin arasındaki ΔZ_c mesafesi ile ölçülebilir. Son olarak, maksimum iç çember metodu (MIC) ile de delik profiline en az iki noktadan değebilecek mümkün olan en büyük çemberin çizilmesi ile ΔZ_i olarak gösterilen maksimum mesafe esasına dayanmaktadır (Sui & Zhang, 2012). Son olarak önerilen yüksek değerli ürünlerin ve

bileşenlerin kalite kontrolünde çok önemli bir rol oynayacak çok sayıda ölçüm noktasındaki silindiriklik sapmasının değerlendirilmesi için Yinelemeli Minimum Bölge Algoritması (IMZA) adı verilen yeni bir hızlı yöntem tasarlanmıştır. Bu yeni yöntem daha gelişim aşamasındadır (Liu ve diğ., 2023).

1.2.3. Silindiriklik (Eksenel Kaçıklık)

Silindiriklik ya da eksenel kaçıklık delik kalitesini etkileyen bir başka sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Delik delme uygulamaları genellikle Z eksenine doğrultusunda yapılmış olsa da hem X hem Y eksenine doğrultusunda da olabilir. Hatta 3 ekseninde aynı anda açılı bir şekilde de delik delinebilir. Bu deliklerin farklı yüksekliklerinden en az iki ve daha fazla dairesel ölçüsünün tespiti ile silindiriklik ölçülmüş olmaktadır. Silindiriklikten sapma tolerans bölgesi içerisinde olmalıdır. Silindiriklik tolerans bölgesi sınırları içerisindeki her delik, kabul edilebilir delik kalitesi anlamına gelmektedir. Delik kalitesi yönünden silindiriklikten sapma, kesici takım özellikleri, proses parametreleri, delme şartları, makinanın hassasiyeti, işlenen malzemenin cinsi delik delme esnasında oluşan sıcaklık ve takım aşınmasından doğrudan etkilenmektedir.

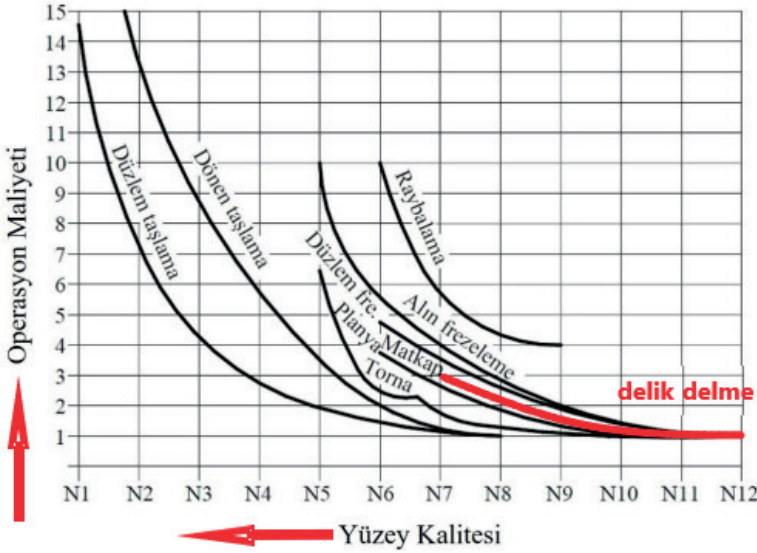
Özellikle derin delik uygulamalarında, delik boyu ile delik çapı arasındaki oranın (L/D) yüksek olması önem taşır. Eksenel kuvvetin artması, ana mildeki sehimi arttırarak eksenel kaçıklığın büyümesine sebep olmaktadır. Kesici takımın pens içinde kalan kısmı ile birlikte kesici takımın bağlantı boyu da önemlidir. Ayrıca delme işlemlerinde oluşan talaşın tahliyesi ve sıcaklıkla oluşan termal genleşmeler, delik kalitesini etkileyen faktörler arasındadır (Şirin, 2021).

1.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Delik kalitesinin en önemli özelliklerinden biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Malzemenin sahip olduğu yüksek yüzey kalitesi, üstün tribolojik özellikler ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Bu gibi nedenlerle özellikle birbiri ile çalışan montajlı parçaların verimi yüzey kalitesi tarafından doğrudan etkilenmektedir. Parçaların çalışma özelliklerine ve istenen performansa göre belirli toleranslar verilmelidir. Düşük-dar toleranslarda istenen yüzey pürüzlülüğü işleme maliyetlerini artırmaktadır. Yüzey kalitesinin operasyon maliyetlerine etkisi Şekil 1.17'de gösterilmiştir (Yılmaz, 2022). Buna göre bir delik delme işleminde sağlanabilecek yüzey kalitesinin yüksekliği işleme maliyetlerini 3-4 kata kadar artırdığı görülmektedir.

İşlenmiş parçaların yüzey kalitesi, parçaların montajında da çok önemlidir. Üretim maliyeti ile birlikte işlenmiş parçaların performansı, elde edilen

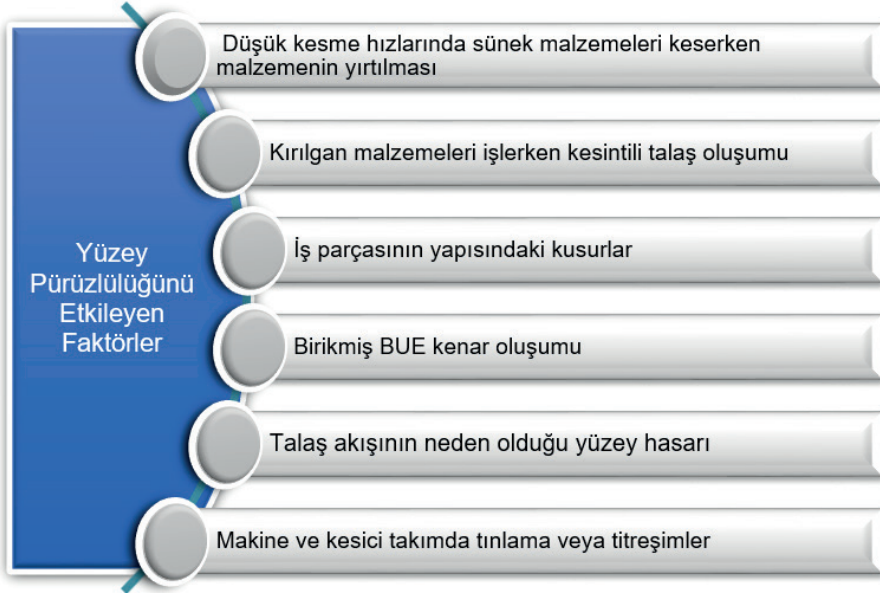
yüzey pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilenir. Delinen deliklerdeki yüzey pürüzlülüğü, sürünme, aşınma, yorulma ve korozyon mekanizmaları buna bağlı olduğundan çok önemli bir delik kalitesidir. İyi yüzey kalitesi yalnızca ürün kalitesini sağlamakla kalmaz, parça bazında maliyetleri artırırken, birbiriyle çalışan parçaların veriminin artması neticesinde toplam maliyeti düşürebilir (Lotfi, 2020).



Şekil 1.17: Talaşlı imalat proseslerinde yüzey kalitesi- operasyon maliyeti grafiği (Yılmaz, 2022)

Genellikle ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) olarak değerlendirilen yüzey pürüzlülüğü, herhangi bir işleme operasyonundan kaynaklanan bir iş parçasının yüzey düzensizliklerini değerlendirmek için kalite açısından ölçülebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, deliklerdeki yüksek yüzey pürüzlülüğünün, üretim sürecini ve nihayetinde üretim maliyetini doğrudan etkileyen malzemede aşırı aşınma ve yorulmaya neden olduğu delik kalitesinin en önemli özelliklerinden biridir. Delme işleminde iş parçası malzemesinin özellikleri, işleme yöntemi, işleme parametreleri ve işleme koşulları dışında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler Şekil 1.18'de verilmiştir (Aamir ve diğ., 2020; Zhang & Chen, 2009). İşlenebilirlik çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Delik yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğünün ölçümü sırasında diğer durumlara göre bir takım zorluklar ile karşılaşılmaktadır. Delik çapı küçüldükçe deliklerin yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi basit cihazlarla yapılması mümkün değildir.

Dolayısıyla bu durumun önüne geçmek için özel uç ve aparatlar gereklidir (Kivak ve diğ., 2010).



Şekil 1.18: Yüzey pürüzlülüğüne etkileyen faktörler (Aamir ve diğ., 2020)

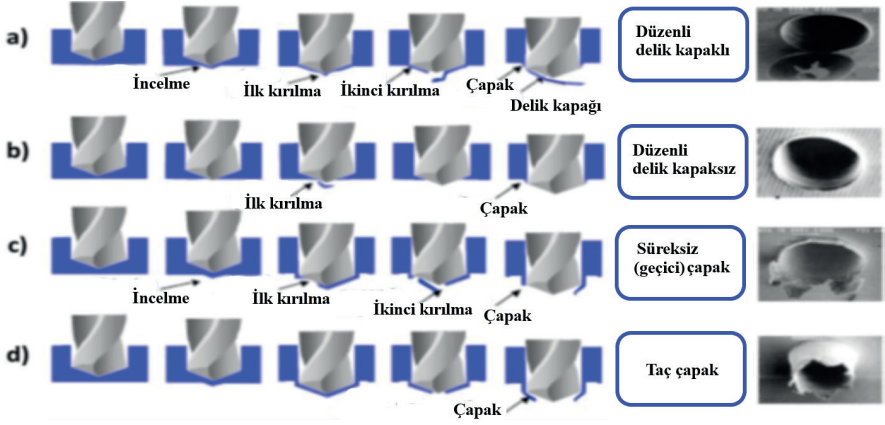
Delik işlemleri genellikle son işlem olarak görülmeyebilir. Çok hassas kullanımlar için delik delme işleminin en iyi sonuç verdiği durumlarda bile parçanın kullanılacağı yer itibarı ile yeterli olmadığından başka bir üretim yöntemleri ile işleme yapılabileceği (bazı durumlar için) unutulmamalıdır. Yüzey pürüzlülüğü genellikle R_a (ortalama pürüzlülük), R_z (tepeler ile çukurlar arasındaki ortalama mesafe) ve R_t (en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki mesafe) cinsinden ölçülür. İşlenmiş yüzeylerin kalitesini incelerken R_a , R_z ve R_t değerlerinin yüksek olması yüzeyin daha pürüzlü olduğunu gösterir. Alüminyum ve Titanyum alaşımlarının yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki malzeme yapışması, besleme işaretleri, oluklar veya oyuklar gibi düzensizliklerin miktarından etkilenir. Yüzey pürüzlülük parametreleri arasında R_a ölçümünün yaygın olarak kabul edildiği bilinmektedir (Dahnel, 2017).

1.2.5. Çapak

Delme sırasında çapak oluşumu olasılığı vardır. Bu çapaklar, malzemeden talaş kaldırma sırasında oluşan küçük parçalar olarak ifade edilir. Delik delme işleminde çapak boyutunu azaltmak için çapak oluşum mekanizmasının

anlaşılması önemlidir. Delik kenarlarının etrafındaki deliklerin hem girişinde hem de çıkışında oluşurlar ve bu da boyutsal doğruluğu etkiler. Girişteki çapaklar genellikle küçüktür ve sonrasında pah işlemi yapılarak çapağın alınma işlemi oldukça kolaydır. Ancak deliklerin çıkışında gerçekleşen çapağın alınması ise zordur. Kesici takım deliğin çıkışına yaklaştıkça malzeme plastik olarak deformasyona uğrar ve eğer malzeme deformasyonu sürdürmezse, o zaman deliğin kenarlarında bir çatlağın başlaması beklenir. Ayrıca deliğin ortasında veya kalan kısmında kırılma olasılığı vardır. Ayrıca, kesici matkap ucu bir deliğin çıkış tarafına ulaştığında, malzemenin bir kısmı kesilmeden itme kuvveti tarafından dışarı itilir, böylece delik çıkışında çapaklar oluşmuş olur. Talaşın ve çapağın oluşma mekanizması malzemeye göre farklılık gösterir. Kırılgan malzemelerde plastik deformasyona uğramadan talaşın kırılma ve kopma işlemi gerçekleşebilir. Bu malzemelerde çapak daha az olabilir. Çapak delik kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Oluşan çapağın alınması için ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu işlemde, toplam imalat maliyetinin % 30'una kadar ilave maliyet oluşturabilir. Çapak alma işlemleri genellikle manuel olarak yapılır. Bu yüzden işleme süresi artar ve üretim verimliliği azalır. Çapak, boyutu yükseklik, kalınlık, genişlik olarak değerlendirilir. Çapaklar normalde iş parçası malzemesi özelliklerine, delme parametrelerine, kesme kuvvetlerine ve talaş oluşumuna bağlı olarak Şekil 1.19'da da görüldüğü üzere düzenli, süreksiz ve taç şekillerinde oluşmaktadır.

Düzenli çapaklar, kesici takımın kesme kenarı tarafından malzemeye sıkıştırma gerilimi uygulandığında deliğin merkezindeki ilk kırılmayla oluşturulur. Takımın ilerlemesiyle plastik deformasyon bölgesi deliğin merkezinden matkapın kenarlarına doğru uzandığından delik çevresinde ikinci bir kırılma meydana gelir. Süreksiz çapaklanmada kırılma, deliğin merkezinde ve çıkışta deliğin çevresinde aynı anda meydana gelir. Taç çapakları çıkış deliğinin çevresinde büyük boyutlardadır ve düzensiz şekillidir. Yüksek ilerleme hızı sonucunda itme kuvvetinin artması nedeniyle deliğin merkezindeki yüksek plastik deformasyonun meydana gelmesiyle bu sonuca ulaşılmaktadır. Talaşlı imalatın her alanında kesici takımda aşınma söz konusudur. Delik delme işleminde kesici takımın aşınması itme kuvvetini artıracığından çapak oluşumunu artırmaktadır. Delme sırasında iş parçası üzerinde kesici takımın itme kuvveti azaltılabilirse, ortaya çıkan çapak boyutu azaltılabilir (Aamir ve diğ., 2020; Chang, 2010).



Şekil 1.19: Delme sırasında çapak oluşum mekanizmalarının şeması (Dabnel, 2017)

1.2.6. Delik Delme Esnasında Oluşan Talaş

Talaşlı imalat açısından delik delme işlemi Şekil 1.20’de verildiği gibi matkap, takma uçlu takımlar ve U-driller ile gerçekleşir. Genellikle iki ağızlı olan delme kesici takımları üç ve daha fazla ağızlı da olabilir. Talaş oluşumu, delik kalitesini doğrudan etkilemektedir. Talaş oluşumu ve sonrasında talaşın tahliyesi delik delmenin en önemli aşamasıdır. Talaşların tahliyesi kesici takım üzerindeki helisel boşluklar sayesinde gerçekleşmektedir. Talaş oluşumu GDD’de iş parçası malzemesi, kesici takımın geometrisi, proses parametreleri (V_c , f_n) ve soğutma yönteminin seçiminden etkilenir. UDD ise, tüm bu değişkenlere genlik ve frekans da eklenmektedir. Talaşın kesici takım iş parçası arasından problemsiz uzaklaştırılması, elde edilen talaşın kabul edilebilir bir uzunlukta olduğu anlamına gelmektedir. Literatürde de bu durum ispatlanmıştır (Kıvak, 2012; www.sandvik.coromant.com., 2022).



Şekil 1.20: Delme kesici takımları (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

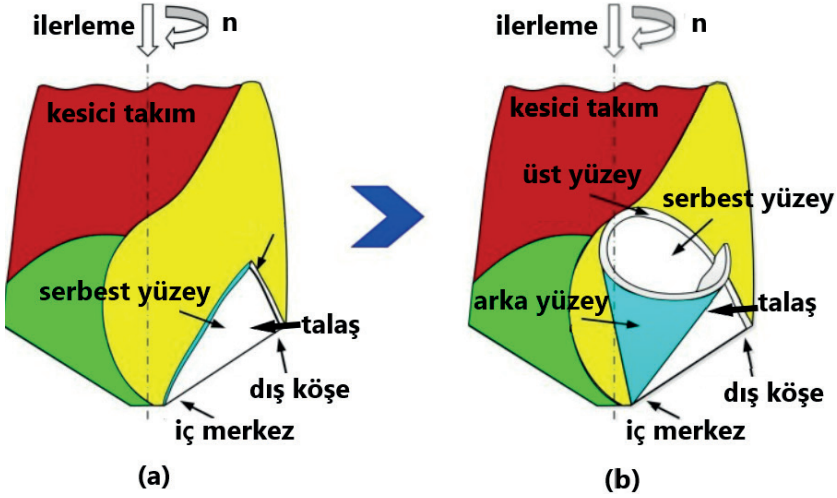
Delme esnasında talaş tahliyesinin istenen ve istenmeyen şekilde gerçekleştiği takdirde ortaya çıkabilecek muhtemel delik yüzeyi Şekil 1.21’de verilmiştir. Talaş sıkışmasının yüzey üzerinde olumsuz etkisinin olması kesici takım aşınması/kırılması hatta enerji maliyetlerinin artması ve tezgâhın aşırı zorlanmasına kadar gidebilmektedir.



Şekil 1.21: Talaş tahliyesine bağlı delik yüzeyi: a) İstenmeyen b) İstenen (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

Tornalama ve frezeleme (ortogonal kesme) işlemlerinde, talaşların kesici kenardan çıkmasıyla talaş oluşumu tamamlanır. Ancak delme işleminde talaş, kesici kenardan çıktıktan sonra spiral kanal boyunca dışarı akmaya devam eder. Talaş oluşumu sırasında kesici takım ve iş parçası arasındaki etkileşimler

karmaşıktır. Şekil 1.22’de delme işleminde talaş oluşumu gösterilmiştir. Şekil 1.22a, kesme kenarı boyunca talaşın düzgün bir şekilde oluşmadığını göstermektedir. Şekil 1.22b’de spiral talaş başlangıcı görülmektedir.



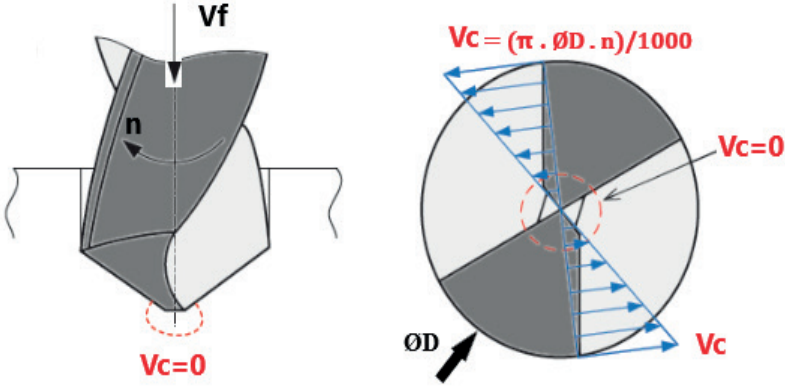
Şekil 1.22: Delme işleminde talaş oluşumu; (a) ilk oluşum; (b) spiral hal alışı

Kesici takımın uç açısı, kesme kenarı ve matkapların özel formlarından dolayı talaşın oluşumu düzgün değildir. Kesme kenarı boyunca talaş açısı ve kesme hızı matkap merkezinden dış köşeye değişir. Kesici takımın merkezinde kesme hızı sıfır kabul edilmektedir. Bu durum Şekil 1.23’de gösterilmiştir. Ayrıca matkap merkezinde talaş açısı negatiftir ve kesme hızı sıfıra yakın iken en dış kesici kenarda maksimum değerine ulaşır. Ayrıca talaş oluşumu sırasında takımın kesici kenarlar üzerindeki noktaların kesiti de Şekil 1.24’de verilmiştir. İç kesici kenar, dış kesici kenardan daha yavaş hareket eder. Bu nedenle, talaş başlangıçta oluşturulduğunda, dış köşeye yakın talaş doğası gereği delme merkezine yakın olandan daha uzundur. Bu sebep, dış talaşın matkap merkezine akmasına neden olabilir. Delme ilerledikçe, talaş Şekil 1.23b’de görüldüğü gibi spiral helisel kanal boyunca akmaya devam eder. Daha sonra spiral bir şekil oluşturur (Zhu ve diğ., 2018).

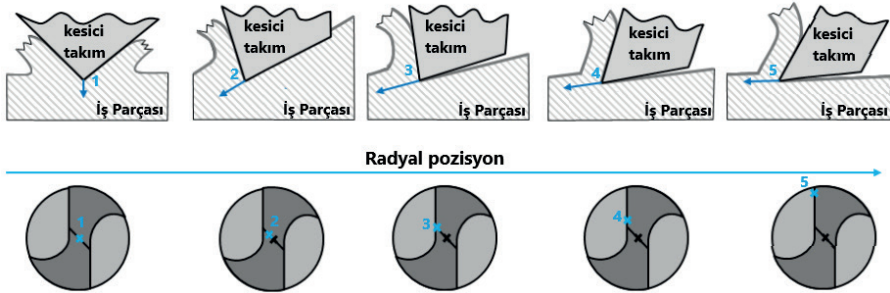
Talaşlı imalattaki delme işlemlerinde kesme hızının azalması ve ilerleme hızının artmasına bağlı olarak genellikle kısa talaş oluşumu gözlenir. Ayrıca Şekil 1.25’de delme parametrelerindeki (V_c , f_n) değişime göre talaş şekillerindeki değişim görülmektedir.

Düşük kesme hızı ve ilerleme hızlarında talaşın daha kapalı aynı zamanda yumuşak, yüksek kesme hızı ve ilerleme hızlarında ise daha açık ve sert

talaşlar oluşmaktadır. Kesme hızının artışı talaşın incelmesine, ilerleme hızının artması ise de talaşın kalınlaşmasına sebep olmaktadır (Kıvak, 2012) (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022).



Şekil 1.23: Kesme hızı şematik gösterimi (Ladonne, 2016)



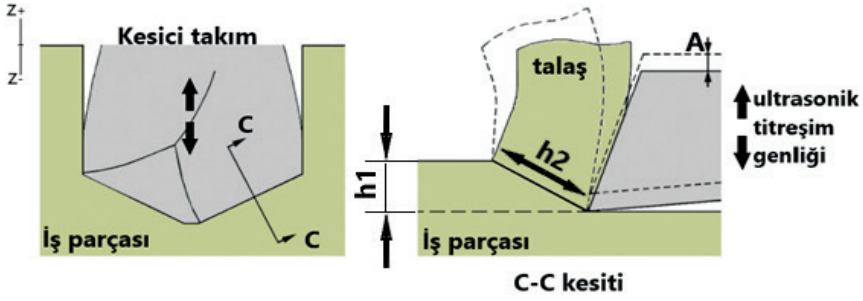
Şekil 1.24: Talaş oluşumu esnasında kesici kenarlar üzerindeki noktaların kesiti (Ladonne, 2016)



Şekil 1.25: Talaş oluşumunun delme parametrelerine göre değişimi (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

Şekil 1.26'da gösterildiği gibi, UDD (Ultrasonik Destekli Delme) işlemi sırasında, kesici takımın A noktasındaki genlik değerinde Z yönünde aralıklı hareketi, iş parçası ile matkap ucu arasındaki toplam ısı transfer süresini azaltabilir ve geleneksel delme yöntemine kıyasla aralıklı talaş oluşumuna neden olabilir. Ayrıca, kesici takımın ilerleme yönündeki doğrusal hareketi, talaş gerilmesinin artmasına ve sonuç olarak kırık (sürekli) talaşların oluşmasına yol açabilir (M. Lotfi & Amini, 2017). UDD'de iş parçası malzemesinin özelliğine, frekans ve genliğe bağlı olarak her zaman sürekli talaş oluşturur beklentisi de olmamalıdır.

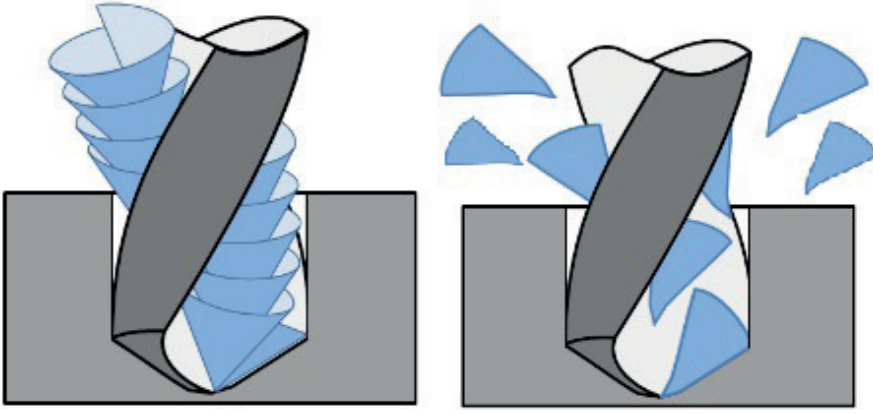
Kesici takımın (matkap) çevresinden merkeze doğru yaklaştıkça kesme hızı azalır. GDD'de kesme hızının azalması BUE (yığılma kenara aşınması) oluşumu riskini ortaya çıkarmaktadır. Matkapın merkezine yakın bir yerde oluşacak BUE oluşumu kabul edilebilir bir durumdur. Ancak kesme hızının düşürülmesi BUE oluşumunun çevreye daha yakın bir bölgede oluşmasına neden olacaktır, dolayısıyla sakıncalıdır. GDD işlemi esnasında talaşın plastik deformasyona uğraması nedeniyle, deformasyona uğramış talaş kalınlığı (h_2) teorik talaş kalınlığından (h_1) farklı olabilir (Kıvak, 2012). UDD, BUE oluşumunu erteleyerek takımın ömrünü artırmaktadır.



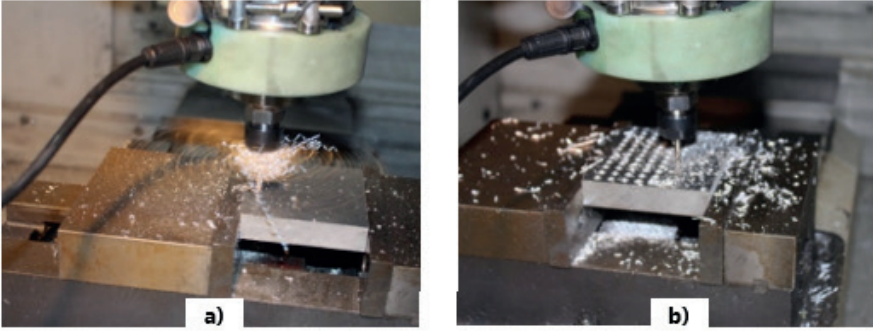
Şekil 1.26: Ultrasonik delik delme esnasındaki talaş oluşumu (M. Lotfi & Amini, 2017)

Sünek malzemelerin düşük ilerleme hızına bağlı talaş derinliğinin az olması ve yüksek kesme hızları kullanılarak işlenmesi ile ince, açık ve sürekli talaş oluşabilir. İş parçasının sünek yapısı talaşın kırılmadan (istenen şekilde) akması ve talaş sıkışmasına neden olmayan durumlarda, yüksek yüzey kalitesi ile delik delinme işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 1.27a'daki gibi sürekli talaşın çok fazla olumsuzluğunuun olduğu da unutulmamalıdır. Ayrıca sünek malzemelerin uygun olmayan (düşük ya da orta) kesme hızları ile işlendiği veya kesici takımın aşınma sürecine girdiği durumlarda ise yığıntı talaş oluşabilir. Yığıntı talaş kesici takım üzerinde oluşur, yapışma oranı arttıkça takım üzerindeki yığıntı talaş da büyür. Yığıntı talaşın kesme bölgesinden koparak uzaklaşması sırasında kesici takımdan malzeme koparak takımın zarara uğramasına ve takım ömrünün azalmasına neden olur. Şekil 1.27b'deki gibi sürekli (kırık) talaş, genellikle gevrek malzemelerin işlenmesi sırasında oluşur.

GDD'de talaşın kendiliğinden kırılmasının yanında, talaşın iş parçasına çarparak ve talaşın kesici takıma çarparak kırılması gibi üç ayrı sebep ile talaş kırılabilir (Yılmaz, 2022). UDD yöntemi ile kesici takımın kesici kenarının belirli genlik değeri kadar iş parçasından ayrılması ve bu işlemin saniyede yaklaşık 20.000 defa gerçekleşmesi doğrudan kesik talaş oluşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 1.27: Delik delme esnasında çıkan talaş (a) Sürekli talaş; (b) Süreksiz talaş (Ladonne ve diğ., 2015)



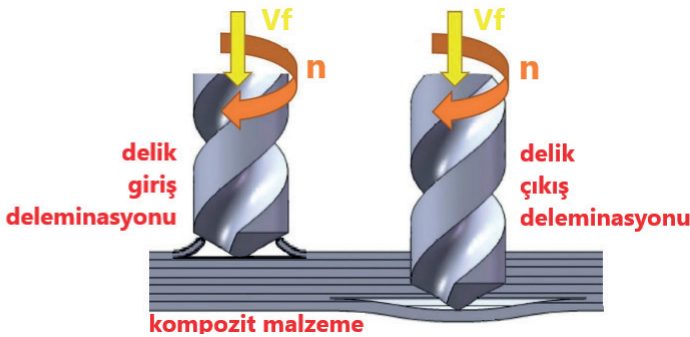
Şekil 1.28: Delik delme uygulaması; a) GDD ile, b) UDD ile

Şekil 1.28a'da, GDD yöntemi ile gerçekleştirilen delme işlemi sonucunda kesici takıma sarılan sürekli bir talaş oluşmakta ve bu durum talaş sıkışmasına sebep olabilir ve delik kalitesini olumsuz etkileyebilir. Öte yandan, Şekil 1.28b'de UDD yöntemi ile gerçekleştirilen delik delme uygulamasında, talaşın kırık talaş halini aldığı gözlemlenmektedir.

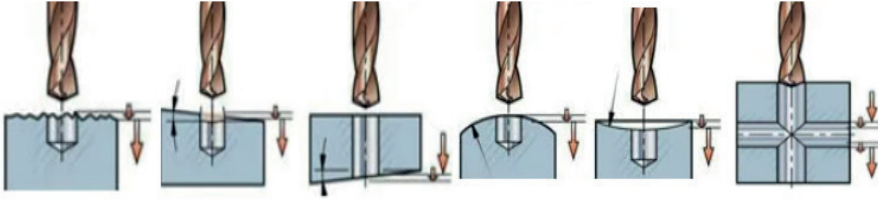
Günümüzde pek çok araştırma, parçaların mukavemetinin artırılması ve ağırlıklarının azaltılması veya benzersiz özellikler elde edilmesi üzerine odaklanmıştır. Kompozit malzemeler bu araştırmaların sonuçlarından biridir. Bununla birlikte, matris ve takviye malzemesinin farklı malzeme özellikleri, geleneksel işleme sırasında genellikle hızlı takım aşınması ve kompozitin tabakalara ayrılması gibi bazı zorluklara neden olur (Kuruc ve diğ., 2017). Tüm işleme operasyonları arasında delme, farklı parçaların bir araya gelerek montajının gerçekleşmesi için delik oluşturmak gereklidir. Delaminasyon,

iş parçasının alt yüzeyinde (matkap çıkışı) kompozit malzemelerde delik delinmesi esnasında ciddi sorunlardan biridir. Fiber takviyeli plastiklerin ya da katmanlı kompozitlerin delinmesinde delik kalitesini olumsuz etkileyecek şekilde özellikle giriş ve çıkışlarda delaminasyon kusurları Şekil 1.29'daki gibi görülmektedir. Bunlara karşı koymak için proses parametreleri, kesici takımın özellikleri, vb. ya da destek plakası konulmak suretiyle çeşitli çözümler aranmaktadır (Tsao & Hocheng, 2005). Bununla da kalmayıp, delaminasyonu azaltmak için gagalama delme tekniği ve ardından önceden delinmiş pilot delikler ile de çözüm aranmıştır. Daha düşük iş mili hızı ve ilerleme hızı değerleri kullanılırsa, geleneksel açılan deliklerin yüzey kalitesi iyileşir. Gagalama delme ile delme en düşük pürüzlülük değerlerini verir sonucuna da ulaşılmıştır (Phapale ve diğ., 2020). Gagalama işlemi gerek kalmadan, UDD tekniği doğru parametrelerde çalışıldığında delaminasyon sorunun çözümüne katkı sunmaktadır. Delaminasyon, delme işleminde ultrasonik titreşim uygulanmasıyla azaltılır. Bu delaminasyon azalması, iş mili hızı azaldığında daha belirgindir. İlerlemedeki artış delaminasyonu hem UDD'de hem de GDD'de olumsuz etkiler (Sanda ve diğ., 2016).

Bazı iş parçalarının delik delinmesi gereken yüzeyleri Şekil 1.30'da görüldüğü gibi olabilir. Şekil incelendiğinde bir grup düzensiz yüzeyin olduğu ve her birini delik delinmesi zorunda kalınabileceği durumlar olabilecektir. Bu gibi durumlarda yüzeylere delik delinirken talaş akışı ve oluşumunda farklılıklar görülür ayrıca kesici takımın kesme kenarlarında aşırı zorlanmalar gerçekleşir. Bu sebeple kesici takımın beklenenden daha erken şekilde aşınmasına ya da takımın kırılmasına sebep olabilir. İş parçasının düzensiz yüzeylerine delik delme mecburiyeti olduğunda UDD yöntemi delik kalitesini iyileştirme ve kesici takım ömrü açısından katkı sağlayabileceği de düşünülmektedir.



Şekil 1.29: Delme esnasında oluşan delaminasyonu (A. H. Lotfi, 2020)



Şekil 1.30: Bir iş parçasının düzensiz yüzeylerine delik delinmesi (www.sandvik.coromant.com, 2022)

1.3. Proses Parametreleri

İşlenecek olan iş parçasının üretimini gerçekleştirirken uygun imalat yönteminin belirlenmesi önemlidir. Belirlenen her imalat yöntemlerinin kendine özgü proses parametreleri bulunmaktadır. Proses parametrelerinin uygun seçilmesi ya da belirlenmesi iş parçasının minimum maliyetle maksimum kalitede üretilmesi anlamına gelmektedir. Ultrasonik delik delme yöntemi ile birlikte delme işleminde ana proses parametreleri kesme hızı (V_c), ilerleme hızı (V_f), frekans (f) ve genlik (A) olarak değerlendirebiliriz. Bu veriler ışığında bilgi edinilmek istenen talaşlı imalat ile ilgili tüm değerler formüllerle hesaplanabilmektedir. Günümüzde çoğu delik delme işlemi, CNC kontrollü takım tezgâhlarında yapılmaktadır. Takım tezgâhlarına belirlenen bazı proses parametrelerinin girilmesi ile delik delme işleminin gerçekleşmesi mümkündür. Bu parametrelerinin eldeki veriler neticesinde kolaylıkla hesaplanarak bulunur. Delik delme işleminde kullanılan formüller aşağıda sıralanmıştır.

1.3.1. Kesme Hızı

Talaş kaldırma işlemlerinin temelinde bir dakikada kesicinin metre cinsinden aldığı yol olarak ifade edilen kesme hızı Şekil 1.31’de görüldüğü üzere V_c olarak gösterilir. Delme işlemlerinde çevresel hız olarak da bilinmektedir. Kesici takım kataloğunun tavsiye edilen verilerinden veya tecrübelerden faydalanılarak, kullanılacak kesici takım çapına göre takım tezgâhına girilecek devir sayısı (n) da aynı formülden çekilerek bulunabilir.

$$V_c = (\pi \times \text{ØD} \times n) / 1000 \text{ [m/dak]} \quad (3.1)$$

Yüksek kesme hızları, kesici takımın aşınmasına sebep olabilmektedir. Böylece düşük takım ömrü, düşük delik kalitesi ve boyutsal toleransların dışına çıkılmasına gibi sonuçlarla karşılaşılabilir. Düşük kesme hızları ise yığıntı talaş oluşumuna buna bağlı yine düşük takım ömrüne,

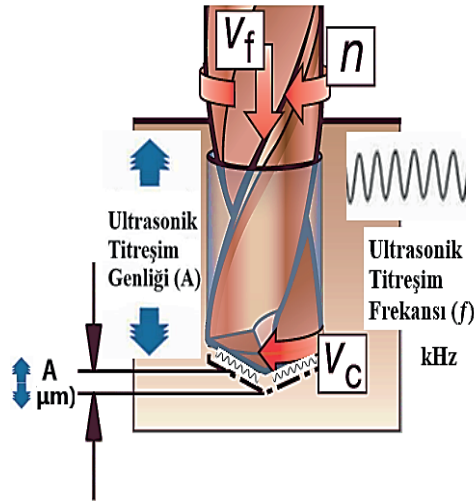
talaşın tahliyesinde bir takım zorluklara ve uzun işleme zamanları ile artan maliyetlere yol açmaktadır (Yılmaz, 2022).

1.3.2. İlerleme Hızı

Şekil 1.31’de görüldüğü üzere V_f ile gösterilen ilerleme hızı, mm/dak cinsinden birim zamanda alınan yol olarak ifade edilmektedir. Başka biş deyişle, kesici takımın iş parçasına göre veya iş parçasının takıma göre doğrusal ilerlemesidir. Bu aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir. Devir başına ilerleme (f - mm/dev) ilerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir tanımlama olup, takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesi anlamına gelmektedir (Kıvak, 2012).

$$V_f = f \times n \text{ [mm/dak]} \quad (3.2)$$

Delme işleminde, tornalama işleminde olduğu gibi genellikle devir başına yapılan ilerleme oranı kullanılmaktadır. Ancak bir devirde kaldırılan talaş kalınlığı (talaş yükü) tornalama ve delme operasyonlarında farklılık gösterir. Tornalama işleminde bir devirde ilerleme oranı kadar talaş kaldırılırken, delme işleminde takımın genellikle iki ağızlı olması nedeni ile kaldırılan talaş kalınlığı ilerleme oranının yarısı kadardır. İlerleme hızı matkap çapı ile orantılıdır. Matkap çapının büyük seçildiği operasyonlarda yüksek ilerleme oranları kullanılabilir. Artan takım çapının matkap mukavemetini artırması ve matkabin daha yüksek ilerleme kuvvetlerine dayanabilmesi bu durumda etkilidir (Yılmaz, 2022).

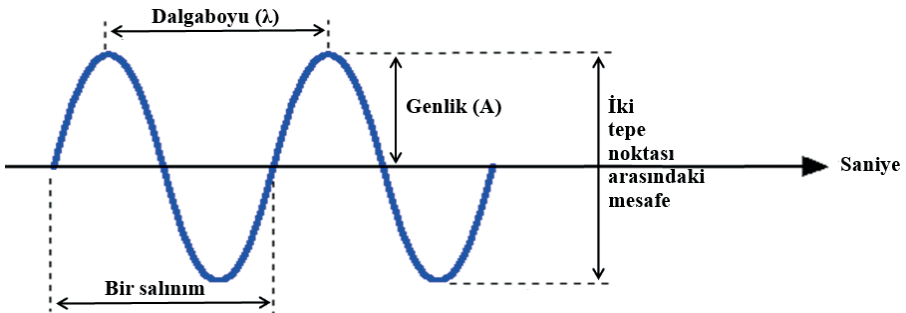


Şekil 1.31: UDD/GDD proses parametreleri

1.3.3. Ultrasonik Titreşim Frekansı ve Genlik

Geleneksel delik delme yönteminde kesici takımın kesici kenarı, kesim esnasında iş parçası ile sürekli bir temas halindedir (Enis, 2023). Delik delinmesi sürecinde talaş oluşumunun kapalı bir bölgede gerçekleşmesi diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre talaş kontrolüne dışarıdan müdahaleyi imkânsız kılmaktadır. Talaş tahliyesi delme işlemlerinde kesici takımın helisel kanalları ile gerçekleşmektedir. Bu durum kesici takım, talaş ve iş parçası arasında oluşan temasın ve sürtünmelerin artmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2022). Tüm olumsuzlukları ortadan kaldırmak için yeni bir teknoloji olarak önümüze çıkan ultrasonik delik delme, delik delinmesi sürecinde kesici takımın iş parçası ile temasını istenen bir titreşim sayesinde talaşın spiral şekilde değil, parçalanmış olarak çıkmasına olanak sağlamaktadır. UDD'de kesici takım iş parçası ile sürekli temas etmemesine rağmen, her zaman süreksiz talaşın çıkacağı anlamını taşımamaktadır. İş parçası malzemesinin özellikleri, talaşın şeklini değiştirebilmektedir. Kesici takıma ya da iş parçasına titreşim frekans sayesinde verilmektedir. Ultrasonik yöntemlerde takım tutucu ya da mengene tablasına yerleştirilen piezoelektrik seramik plakalar ve jeneratör yardımı ile titreşim verilmektedir. UDD proses parametrelerinde frekans ve genlik birlikte değerlendirilmelidir. Ultrasonik titreşimin frekans ve genlik grafiği Şekil 1.32'de verilmiştir. Frekans, bir saniyelik birim zamandaki salınım sayısı demektir ve f ile gösterilmektedir.

Bir salınımda iki tepe noktası arasındaki yataydaki mesafeye dalga boyu (λ) denir. Genlik ise, tepe noktasından dikey uzaklık olarak bilinmektedir. Genlik, (A) ile gösterilirken birimi μm 'dir. Ultrasonik uygulamalarda genlik parametresi μm cinsinden verilebildiği gibi ultrasonik jeneratörün güç yüzdesi (%) olarak da verilmektedir. Böylece genlik üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahip olan parametrenin ultrasonik güç yüzdesi olduğunu sonucuna varılabilir.



Şekil 1.32: Ultrasonik titreşimin frekans ve genlik grafiği (Dahnel, 2017)

Genel olarak, ultrasonik titreşimleri karakterize etmek için iki parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler titreşimin genliği ve frekansıdır. Delik delinmesi sırasında bir UDD sisteminin frekansı üzerinde bir kontrol yoktur ve bu parametre ultrasonik takım tutucu sisteminin tasarım aşamasında belirlenir. Ultrasonik takım tutucularda, çalışma prensibi ile birlikte tasarım tamamlandıktan sonra, rezonansı korumak için gerçek zamanlı küçük değişiklikler dışında, sistemin temel çalışma frekansı değiştirilemez. Bu nedenle, ultrasonik titreşimlerin etkilerini kontrol etmek için ayarlanabilen tek parametre titreşim genliğidir. Araştırmalar, UDD'nin bildirilen faydalarının çoğunun doğrudan ultrasonik titreşimlerin genliği ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Genel olarak, ultrasonik destekli uygulamalarda titreşim genliğini ölçmek için dört yöntem vardır. Komperatörler gibi temaslı yöntemlerle ölçülebilir. Temassız olarak da optik titreşim sensörleri ile ya da değişken bir manyetik alan sonucu iletkenlerde oluşan Eddy (girdap) akım sensörleri sayesinde ultrasonik genlik ölçümleri yapılabilir. Örnek olarak, temassız yöntem olarak sınıflandırılan lazer vibrometreden okunan mv cinsinden voltaj(V) ve bilinen diğer değerler sayesinde genlik (A) aşağıdaki formülden çıkarılabilir (M. A. Moghaddas & Graff, 2020).

$$A = \frac{5 \times 10^3 \times V}{2 \times \pi \times f} \quad [\mu m] \quad (3.3)$$

Son olarak da mikroskop sayesinde görüntü alınarak yapılabilir. Fakat temassız olarak belirtilen yöntemler diğer yöntemlere kıyasla daha hassas ölçüm sonuçları verebileceği bilinmelidir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise, talaşlı imalat sırasında titreşimli bir takımın genliğinin temas yöntemleri kullanılarak ölçülmesinin neredeyse imkânsız olmasıdır. Ultrasonik delik delme sırasında kesici takımın yük altındayken matkap ucunun genliğinin azalabileceği düşünülmelidir. Ultrasonik güç kaynağı delme işlemi sırasında sabit genliği koruyacak şekilde ayarlandığından, kesici takım delme işlemi yaparken bir frekans kayması görülebilir (Moghaddas & Graff, 2020).

Genlik ve frekansın çarpımı titreşim hızını verir. Titreşim hızı V_v (mm/s), ultrasonik titreşimin genliği A (μm), ve titreşim frekansı f (kHz) ile gösterilmektedir. Delme sırasında matkabın dönmesi nedeniyle, titreşim hızının hesaplanmasında açısal frekans dikkate alınmalıdır. Kesici takımın bir devrinin 2π radyana eşit olduğundan dolayı frekansın 2π radyan ile çarpılması gerekir (Dahnel, 2017).

$$V_v = 2\pi \cdot f \cdot A \quad [mm/s] \quad (3)$$

Kaynaklar

- Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., & Vafadar, A. (2020). A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12484–12500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>
- Azarhoushang, B., & Akbari, J. (2007). Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7–8), 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.007>
- Babitsky, V. ., Mitrofanov, A. ., & Silberschmidt, V. . (2004). Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study. *Ultrasonics*, 42(1–9), 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.02.001>
- Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 124–124. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.296833>
- Biermann, D., Bleicher, F., Heisel, U., Klocke, F., Möhring, H.-C., & Shih, A. (2018). Deep hole drilling. *CIRP Annals*, 67(2), 673–694. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.007>
- Chang, S. S. F. (2010). *Vibration Assisted Drilling of Aluminum 6061-T6*. In McMaster University. McMaster University.
- Dahnel, A. N. (2017). *Conventional and ultrasonic assisted drilling of carbon fibre reinforced polymer/Titanium alloy stacks*. University of Warwick.
- Dassow, J. M. I. (2018). Sensing and Understanding the Resilience of Sandstone [University of Göttingen]. In *School of Geographical and Earth Sciences*. <http://theses.gla.ac.uk/41087/>
- Eltaggaz, A., & Deiab, I. (2019). Comparison of between direct and peck drilling for large aspect ratio in Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12), 2797–2805. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03314-z>
- Enis, M. B. (2023). *Ultrasonic Assisted Drilling Of Precipitation Hardened Martensitic Stainless Steel*. The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Atılım University.
- Gao, J. (2020). *Design , Control and Cutting Process for a Three-Degree-of-Freedom Ultrasonic Vibration Tool Holder* (Issue March). The University of British Columbia.
- Hoang, T. D., Ngo, Q. H., Chu, N. H., Mai, T. H., Nguyen, T., Ho, K. T., & Nguyen, D. (2022). Ultrasonic assisted nano-fluid MQL in deep drilling of hard-to-cut materials. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(6). <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1981936>
- Kivak, T., Habali, K., & Şeker, U. (2010). Inconel 718'in Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Ve Talaş Oluşumu Üzerindeki Etki-

- sinin Araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(2), 293–298.
- Kıvak, T. (2012). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması*. Gazi Üniversitesi.
- Kuruc, M., Vopat, T., Simna, V., & Necpal, M. (2017). Influence of Ultrasonic Assistance on Delamination During Machining of Different Composite Materials. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium* (Issue February 2018, pp. 0392–0399). <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.055>
- Ladonne, M. (2016). *Modélisation du procédé de perçage assisté par vibrations forcées : prise en compte de l'environnement Pièce-Outil-Machine*. [Université de Bordeaux]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02612216>
- Ladonne, M., Cahuc, O., Yves K'nevez, J., Landon, Y., & Cherif, M. (2015). Dynamic Modelling of Vibrations Assisted Drilling. *Conference Proceedings of the Academy of Romanian Scientists - PRODUCTICA Scientific Session*, 7(1), 2018–2022.
- Liu, F., Cao, Y., Li, T., Ren, L., Zhi, J., Yang, J., & Jiang, X. (2023). An Iterative Minimum Zone Algorithm for assessing cylindricity deviation. *Measurement*, 213(March), 112738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112738>
- Lotfi, A. H. (2020). *Study on the Machinability of Natural Fiber Reinforced Composite Materials* [Griffith University]. <https://doi.org/https://doi.org/10.25904/1912/3902>
- Lotfi, M., & Amini, S. (2017). Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling. *Ultrasonics*, 75, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.11.009>
- Lucas, M., Cardoni, A., McCulloch, E., Hunter, G., & MacBeath, A. (2008). Applications of power ultrasonics in engineering. *Applied Mechanics and Materials*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.13-14.11>
- Ma, G., Kang, R., Yin, S., Wang, Y., & Dong, Z. (2022). Effect of amplitude ratios on hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic-assisted drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(7–8), 2911–2926. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10080-y>
- MacBeath, A. (2006). *ULTRASONIC BONE CUTTING*. University of Glasgow.
- Moghaddas, M. A. (2021). Modeling and optimization of thrust force, torque, and surface roughness in ultrasonic-assisted drilling using surface response methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(9–10), 2909–2923. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06380-w>

- Moghaddas, M. A., & Graff, K. F. (2020). On the effect of load on vibration amplitude in ultrasonic-assisted drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7–8), 3081–3094. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04777-w>
- Nath, C., Rahman, M., & Andrew, S. S. K. (2007). A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047>
- Nordenholm, J. (2020). *Research and Testing of an Electromechanical solution for Vibration Assisted Drilling of Aerospace Materials for Vibration Assisted Drilling of Aerospace Materials*. Uppsala University.
- Pavlíková, G., Foltán, R., Horká, M., Hanzelka, T., Borunská, H., & Šedý, J. (2011). Piezosurgery in oral and maxillofacial surgery. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 40(5), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2010.11.013>
- Phapale, K., Singh, R., & Singh, R. K. P. (2020). Comparative assessment of delamination control techniques in conventional drilling of CFRP. *Procedia Manufacturing*, 48(2019), 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.028>
- Sanda, A., Arriola, I., Garcia Navas, V., Bengoetxea, I., & Gonzalo, O. (2016). Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti-6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.003>
- Seçgin, Ö., & İ.Özsert. (2016). *İçi boşluklu parçaların delme operasyonunda verimliliği artıran parametrik program. 3-5 November*, 432–442. <https://www.researchgate.net/publication/309741825%0AİÇİ>
- Short, M., & Graff, K. F. (2015). Using power ultrasonics in machine tools. In *Power Ultrasonics* (pp. 439–507). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00016-8>
- Sirin, E. (2021). *Hastelloy x süper alaşımının delinmesinde nano partikül katkılı kesme yağlarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sui, W., & Zhang, D. (2012). Four Methods for Roundness Evaluation. *Physics Procedia*, 24, 2159–2164. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.317>
- Tamil Alagan, N., Sajja, N. T., Gustafsson, A., Savio, E., Ghiotti, A., Bruschi, S., & Bertolini, R. (2023). Investigation of the quality of Al-CFRP stacks when drilled using innovative approaches. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 43, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.011>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2011). *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (H. Feng, G. Barbosa-Canovas, & J. Weiss (eds.); Vol. 53, Issue 9). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3>

- Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2005). Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), 1261–1270. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.015>
- Wang, D., Li, Z., Tian, S., & Li, T. (2023). Study on dynamic drilling forces of CFRP/Ti stacks during longitudinal-torsional ultrasonic vibration drilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7–8), 2989–3004. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11304-5>
- Yılmaz, B. (2022). *Ti6Al4V Malzemesinin Delinmesinde Farklı Soğutma Yöntemlerinin Etkileri Ve YSA İle Modellenmesi*. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Ankara.
- Zhang, J. Z., & Chen, J. C. (2009). Surface roughness optimization in a drilling operation using the taguchi design method. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(4). <https://doi.org/10.1080/10426910802714399>
- Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Chen, L., & Zheng, Y. (2018). Evolution of 3D chip morphology and phase transformation in dry drilling Ti-6Al4V alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 34(August), 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.001>