

MİKRO TORNALAMA İŞLEMİNDE KENAR RADYÜS ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Kubilay Aslantaş¹ Ahmet Haşcelik²,

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye aslantas@aku.edu.tr

²Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye ahascelik@aku.edu.tr

Özet

Mikro tornalama işlemi, geleneksel tornalama işlemine çok benzemekle beraber, takım geometri etkisinin daha ön plana çıktığı bir kesme işlemidir. Bu nedenle mikro tornalama işleminde kullanılan kesici geometrisinin ve kesme parametrelerinin özenle seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının mikro şartlarda işlenmesi sırasında, takıma ait farklı kenar radyüslerinin kesme kuvveti, takım gerilmeleri ve artık gerilmeler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kesme deneylerinden elde edilen kuvvet verileri ile modelleme sonuçları karşılaştırılmak suretiyle uygun malzeme modeli belirlenmiştir. Farklı kenar radyüsleri için nümerik çözümler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesme hızı ve talaş derinliği sabit alınmıştır. Farklı ilerleme değerleri ile farklı kenar radyüsleri değişken olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, artan kenar radyüsü, kesme (özellikle de ilerleme yönündeki) kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Artan kenar radyüsü, takım gerilmelerinin azalmasına neden olmaktadır. En önemlisi ise; artan kenar radyüsü, yüzey altındaki artık gerilmelerin büyük oranda basma şeklinde oluşmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikro Tornalama, Sonlu Elemanlar Analizi, Kenar Radyüsü

FINITE ELEMENT MODELLING OF EDGE RADIUS EFFECT IN MICRO TURNING PROCESS

Abstract

Micro-turning is very similar to conventional turning, but is a cutting operation in which the tool geometry effect is more important. For this reason, the cutting geometry and cutting parameters used in micro turning must be carefully selected. In this work, during the machining of the Ti6Al4V alloy in micro cutting conditions, the effect of different edge radii of the insert on the cutting forces, tool stresses and residual stresses was investigated. The appropriate material model is determined by comparing the force data obtained from the cutting experiments with the model results. Numerical solutions have been made for different edge radii. The cutting speed and depth of cut were considered as constant. Different feed rate values and different edge radii were chosen as variables. According to the results obtained, the increasing edge radius causes an increase in cutting (especially in the direction of feed) forces. Increasing edge radius causes decrease of tool stresses. Most importantly, the increase of the edge radius causes the residual stresses under the surface to occur, usually in the form of compression.

Keywords: Micro Turning, Finite Element Analysis, Edge Radius

1 Giriş

İmalat sektöründe, zamanla parçaların minyatürleşmesi, gittikçe küçülen cihaz boyutları ve hassasiyeti yüksek parça ihtiyacı yeni arayışlara neden olmuştur. Bütün bu gereksinimler, teknolojinin de gelişmesiyle mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. Günümüzde mikro işleme bütün bu gereksinimlerden dolayı popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir. Son yıllarda, mikro parçaların imalatında karşılaşılan problemleri çözmek adına, çok sayıda çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir [1].

Mikro mekanik işleme yöntemi, iş parçalarını yüksek hızda ve yüksek hassasiyette üretmeyi mümkün kılmaktadır. Mikro mekanik işlemenin diğer yöntemlere (termal ve kimyasal) nazaran farkı yüksek hızda kaldırılan talaş hacminin de daha büyük olmasıdır. Mikro mekanik işleme yöntemlerinin başında, geleneksel

işleme yöntemlerinin, çok küçük boyutlardaki kesici takımların kullanılarak yapıldığı delik delme, frezeleme ve tornalama işlemi gelmektedir. Kendi ekseninde dönmekte olan iş parçası üzerinden eksenini doğrultusunda hareket eden bir kesici takım yardımıyla mikro boyutlarda talaş kaldırma işlemine mikro tornalama denir. Mikro tornalamada talaş derinliği ve ilerleme değeri, iş parçası tane boyutuna çok yakındır. Dolayısıyla mikro mekanik işlemede hem kullanılan kesici geometrisinin hem de talaş kesitinin çok küçük boyutta olması nedeniyle isimlendirmede mikro tanımı kullanılır.[2-3]. Kesme işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için, kesici takımın yüksek devirlerde dönmesi gerekir. Bu durum, mikro takımlarda hızlı takım aşınmasına neden olur [4]. Mikro takımların zarar görmesine neden olan aşınma mekanizması genellikle abrasif aşınma mekanizmasıdır. Abrasif aşınma sonucunda, hem takım geometrisi (özellikle de takım çapı) hem de kenar radyüsü değişir. Bu da, mikro kesme işleminde, kesme kuvvetlerinin artmasına ve işlenen yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur [5-6].

Mikro tornalama, mikro silindirik veya ekstenel simetrik parçaları üretmek için etkili bir yoldur. Aslında mikro parçaların tornalanması yeni bir yöntem değildir. Ancak, parça boyutları mikronlarla ifade ederken bazı zorluklar ortaya çıkar. Bunlardan bazıları; a) iş parçasının çapının küçük olması eğilmeye neden olur, b) eğilmenin etkisiyle kaldırılan talaş kesiti değişir, c) kritik talaş derinliğinde ve ilerleme değerlerinde kesme yerine, kazımın oluşmasıdır. Özellikle kritik ilerleme ve talaş derinliğinin altında yapılan kesme işlemlerinde yüzey altında artık gerilmeler meydana gelir. Bunlar çoğu zaman basma şeklindeki artık gerilmeler [7] olmakla beraber, bazen de çekme şeklinde [8] oluşur. Doğal olarak bu artık gerilmeler, bir sonraki kesme işlemini (özellikle, kesme kuvveti ve yüzey kalitesi açısından) etkiler. İşlenen yüzey altında meydana gelen bası şeklindeki artık gerilmeler parçanın yorulma mukavemetini olumlu etkilerken, çeki şeklinde meydana gelen artık gerilmeler yorulma ömrünü azalmasına neden olur. Bu gerilmelerin büyüklüğü kadar, yüzeyden ne kadar bir derinlikte etkili olduğu da önemlidir. Bu gerilmelerin tespitinde, her ne kadar deneysel yaklaşımlar kullanılsa da, hem pahalı hem de zaman alıcı bir yöntemdir. Bu nedenle, nümerik çözüm yöntemleri, talaşlı imalat sonrasında yüzey altındaki artık gerilmelerin değişimini elde etmek için en çok kullanılan bir tekniktir.

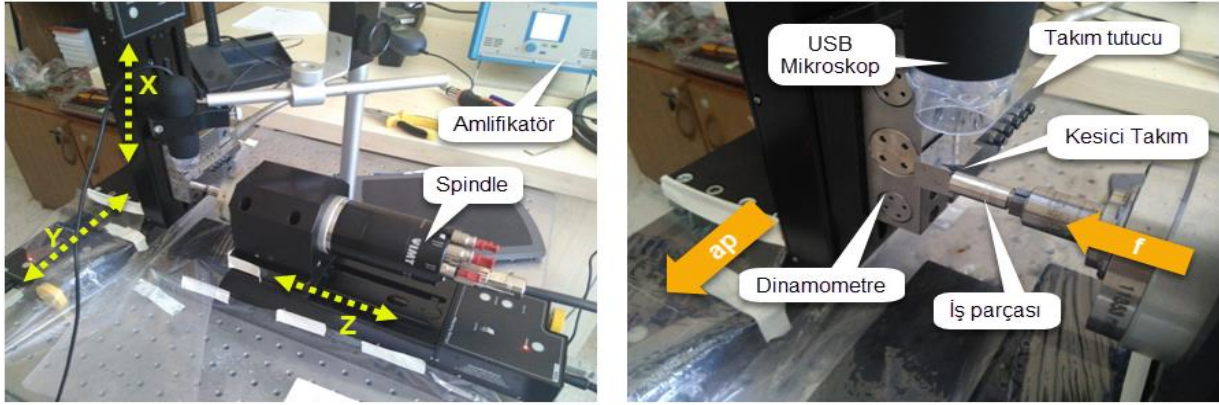
Bu çalışmada, özellikle diş implantlarında sıklıkla kullanılan Ti6Al4V alaşımının, mikro kesme şartları altında işlenmesi sonrasındaki yüzey altı gerilmelerindeki değişim araştırılmıştır. Öncelikle kullanılan malzeme modelinin doğruluğu deneysel sonuçlarla ortaya konulmuştur. Farklı kenar radyüsleri dikkate alınarak, sonlu eleman çözümleri gerçekleştirilmiştir. İşlenen yüzeyde meydana gelen hem radyal hem de çevresel artık gerilmeler ile takım yüzeyindeki gerilmelerin değişimi araştırılmıştır. Ayrıca kenar radyüsünün talaş formu üzerindeki etkisi de tespit edilmiştir.

2 Materyal ve Metot

2.1 Deney Düzenegi

Çalışmada, tüm mikro mekanik kesme işlemlerinin (delik delme, frezeleme ve tornalama) gerçekleştirilebildiği bir deney düzenegi kullanılmıştır. Yatay bir işleme merkezine benzemekte olan deney düzeneginde, iş parçası fener miline sabitlenmiştir. Kullanılan fener mili maksimum 60000 dev/dk'ya kadar çıkabilen IMT markadır ve devir ayarı kendine ait bilgisayar yazılımı ile hassas olarak elde edilebilmektedir. Eksen hareketleri için mikro step motorlarla desteklenmiş lineer kızaklar (Thorlabs) kullanılmıştır. Kızakların maksimum hareket mesafesi 150mm olup hassasiyeti ise 0,1µm dur. Spindle X eksenini hareketini sağlayan kızak üzerine montaj edilmiştir. Kesici takım mini dinamometre üzerine, dinamometre Y eksenini ifade eden kızak üzerine sabitlenmiştir. Talaş derinliği Y eksenini vasıtasıyla verilmektedir [5]. Yanaşma açısının 90° olması ve dinamometreye bağlanabilmesi adına takım tutucu özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneysel kesme bölgesinin daha net olarak gözlemlenebilmesi adına 50-800 arasında büyüme

yapabilen bir USB mikroskop kullanılmıştır. Tüm sistem titreşimsiz optik bir tabla üzerine montaj edilmiştir[5].



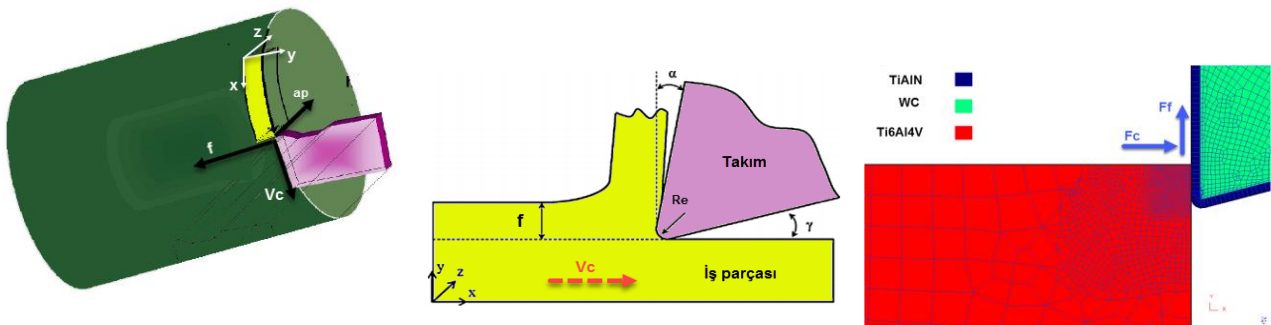
Şekil 1: Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü.

2.2 Kesici Takım ve Kesme Parametreleri

Kesici takım, Kennametal firmasından tedarik edilmiş olup, TiAlN kaplanmıştır (kaplama kalınlığı $2\mu\text{m}$). Takıma ait ISO kodu TDHB07T1202 olup, standart bir takım tutucu kullanılmamıştır. Yanaşma açısı 90° olacak şekilde yeni bir takım tutucu tasarlanıp, imal edilmiştir. Kesici takımın burun radyüsü (R_c) yaklaşık $20\mu\text{m}$ ve kenar radyüsü (R_e) de yaklaşık $7,25\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Kesici takımın talaş açısı sıfır ve boşluk açısı 15° dir. Çalışmada talaş derinliği, $a_p = 40\mu\text{m}$ kesme hızı $V_c = 100\text{m/dk}$ olarak sabit alınmıştır. Çalışmada üç farklı ilerleme $f = 10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ değeri kullanılmıştır. Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup, çıktı olarak kesme kuvvetleri, takım gerilmeleri ve yüzey altı artık gerilmelerinin değişimidir.

2.3 Sonlu Elemanlar Analizi ve Malzeme Modeli

Çalışmada, sonlu elemanlar analizi için Deform 2D yazılımı kullanılmıştır. İş parçası için modellenen geometrideki ağ yapısı yeterince küçük alınmıştır. Bunun için minimum eleman boyutu, ilerleme değerinin dörtte birinden daha küçük olacak şekilde belirlenmiştir. Kesme hızı iş parçasına verilmiş olup, elasto-plastik olarak modellenmiştir. Talaş oluşumu prosesinde remeshing tekniği kullanılarak, her bir çözüm aralığı için yeniden sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Her bir çözüm aralığında kesme esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı veri olarak program tarafından kaydedilmiştir. Çözümlerde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 2'de verilmiştir. Modellemede iş parçası için 4111 adet kesici takımda ise 1154 adet karelik eleman kullanılmış ve problem düzlem şekil değiştirme şartlarında modellenmiştir.



Şekil 2: Tornalama işleminin iki boyutlu ifadesi ve iş parçası ve kesici uç mesh yapısı.

Talaşlı imalat işleminin modellenmesinde malzeme modeli oldukça önemlidir. Doğru sonuçlar elde etmek için malzemenin yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarını dikkate alan bir model kullanılmalıdır. Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli, talaşlı imalatın modellenmesinde en çok kullanılan malzeme modelidir. Bu çalışmada da modifiye edilmiş Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır [8]. Modelin genel ifadesi Denklem 1 de verilmektedir. Bu modelin son çarpanı olarak verilen kısım, sıcaklığın etkisiyle meydana gelen termal yumuşamayı dikkate almaktadır.

$$\sigma = \left[A + B \varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left[D - (1 - D) \left[\tanh \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right]^s \right] \quad (1)$$

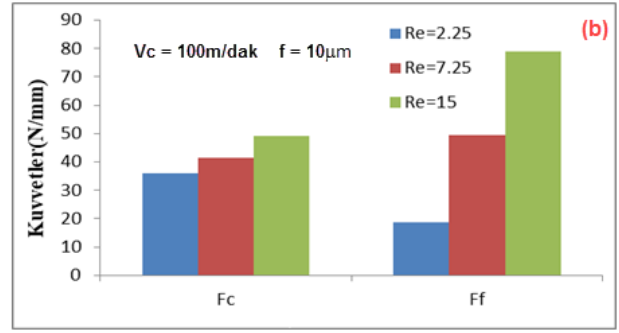
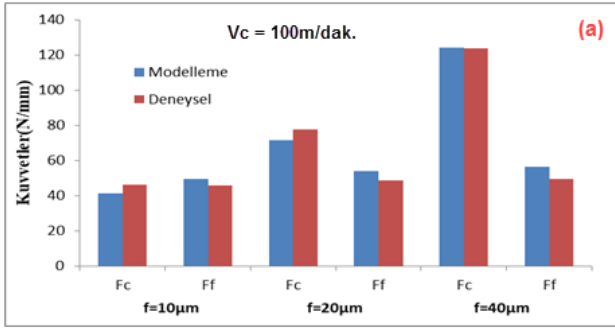
$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d \quad p = \left(\frac{T}{T_m} \right)^b \quad (2)$$

Denklem 1 de verilen, malzeme akma gerilmesi sabiti $A=1343\text{MPa}$, malzemenin pekleşme modülü $B=1092\text{MPa}$, pekleşme katsayısı $n=0,22$, şekil değiştirme hızı hassasiyeti $C=0,06$, malzemenin termal yumuşama katsayısı $m=1,82$ dir [8]. Ayrıca malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi $a=2$, sıcaklığa bağlı akma yumuşama etkisi $b=1$, malzemedeki yumuşama eğilimi $S=5$, D 'nin sıcaklığa bağlılık katsayısı $d=0,5$ olarak alınmıştır [8]. Bu değerler Ti6Al4V alaşımı için literatürden alınmış olup, genellikle çeşitli iterasyon yöntemleri veya deneme yanılma yöntemleri ile tespit edilmektedir [12]. Bu çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımı üretimi sonrasında tavlama işlemi uygulanmış α ve β fazları içeren yaşlandırma yapılmamıştır. Yapılan SEM analizlerinde tane boyutunun ortalama $11.7\mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir [13]. Takım talaş ara yüzeyindeki kayma sürtünme katsayısı sabit ve $0,6$ olarak alınmıştır. İş parçasına ait ısı transfer katsayısı ise $100\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Elasto-plastik çözüm sonrasında, kesici takım modelden çıkartılmış ve tüm iş parçasının sıcaklığı 20°C ye düşene kadar ikinci bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Böylelikle iş parçası yüzeyindeki hem radyal hem de çevresel artık gerilmeler elde edilmiştir. Takım yüzeyindeki gerilmeler için de iş parçası modelden çıkarılarak ikinci bir çözüm yapılmıştır.

3 Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

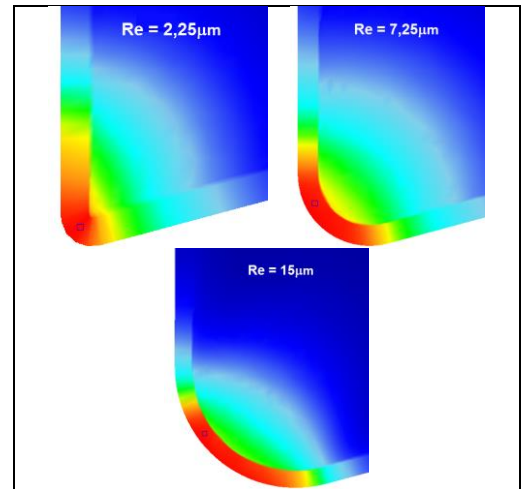
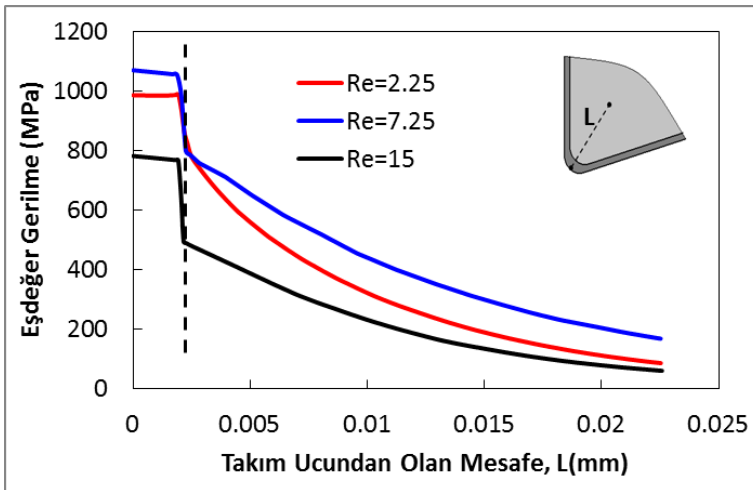
Çalışmanın deneysel kısmında, kesici takıma ait kenar radyüsü $Re = 7,25 \mu\text{m}$ için üç farklı ilerleme değerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kesme kuvveti verileri ile, modelleme sonrasında elde edilen değerler kıyaslanmak suretiyle, kullanılan malzeme modelinin doğrulaması yapılmıştır. Şekil 3 te $Vc = 100\text{m/dak}$. için farklı ilerleme değerlerinde elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 3-a dan da görüldüğü üzere, deneysel kesme kuvveti verileri ile modelleme sonuçları oldukça birbirine yakın ve kabul edilebilir bir hata oranına sahiptir. Şekil 3-a da dikkati çeken diğer bir nokta ise, azalan ilerleme değerine bağlı olarak, F_f/F_c oranının 1 ' e yaklaşmasıdır. Bu oranın 1 ' e yaklaşması demek, kesme işleminin, kayma mekanizmasından ziyade kazınma mekanizmasıyla gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Bu ifadeyi doğrulamak adına, farklı kenar radyüsleri için yapılan nümerik çözüm sonuçları Şekil 3-b de verilmektedir. Şekil 3-b den de görüleceği üzere, ilerleme değerinden daha küçük kenar radyüsünden ($Re=2,25\mu\text{m}$), F_c kuvveti F_f kuvvetinden daha büyüktür. İlerleme değerine yakın kenar radyüsünde ise, F_c kuvveti ile F_f kuvveti birbirine yakın değerler almaktadır. İlerleme değerinden daha büyük bir kenar radyüsü kullanıldığında, F_f kuvveti, F_c kuvvetinden den çok daha büyük olduğu görülmektedir. Kenar radyüsünün çok büyük olması, takımın, negatif talaş açısına sahip bir kesici gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu da talaş oluşumunu zorlaştırmakta ve ilerleme kuvvetini arttırmaktadır. Şekil 3a da ilerleme kuvvetinin bariz bir şekilde artmadığını söylemek mümkün. Bunun da nedeni takım talaş ara yüzeyinde sürtünme katsayısının çok değişmemesi gösterilebilir. Fakat kenar radyüsünün artmasına bağlı olarak hem takım talaş temas boyu artmakta hem de sürtünme kuvvetleri artmaktadır. Bu da F_f kuvvetinin daha belirgin artışına neden olmaktadır (Şekil 3b).



Şekil 3: İlerleme(f) ve kenar radyüsünün(R_e) kesme kuvvetleri üzerinde etkisi.

3.2 Takım Gerilmeleri

Kenar radyüsüne bağlı olarak, kesici takım yüzeyinde meydana gelen eşdeğer gerilmelerin değişimi Şekil 4 te verilmektedir. Şekil 4 te verilen sonuçlar $V_c = 100\text{m/dak}$ ve $f = 10\mu\text{m}$ değişkenleri için Deform 2D-V11 yazılımından elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan kaplama kalınlığı $2\mu\text{m}$ olarak sabit alınmıştır. Şekil 4 ten görüldüğü üzere, kaplama malzemesinin son bulunduğu mesafede, eşdeğer gerilmeler ani bir azalma eğilimi göstermektedir. Kenar radyüsünün $2,25\mu\text{m}$ dan $7,25\mu\text{m}$ 'a artması bir miktar gerilmelerin artmasına neden olsa da, $Re = 15\mu\text{m}$ için elde edilen gerilme değerleri daha küçüktür. Artan kenar radyüsü takım ucunun rijitliğini arttıracaktır. Bunun sonucunda takım ucunda meydana gelen gerilmelerin de azalması beklenir. Fakat artan kenar radyüsü kesme kuvvetlerinin de artmasına neden olur. Bu nedenle $Re = 7,25\mu\text{m}$ için elde edilen gerilme değeri, $Re = 2,25\mu\text{m}$ dan daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. Yani takıma etki eden kesme kuvvetleri, artan kenar radyüsünün sağladığı rijitlik artışına nazaran daha baskındır.

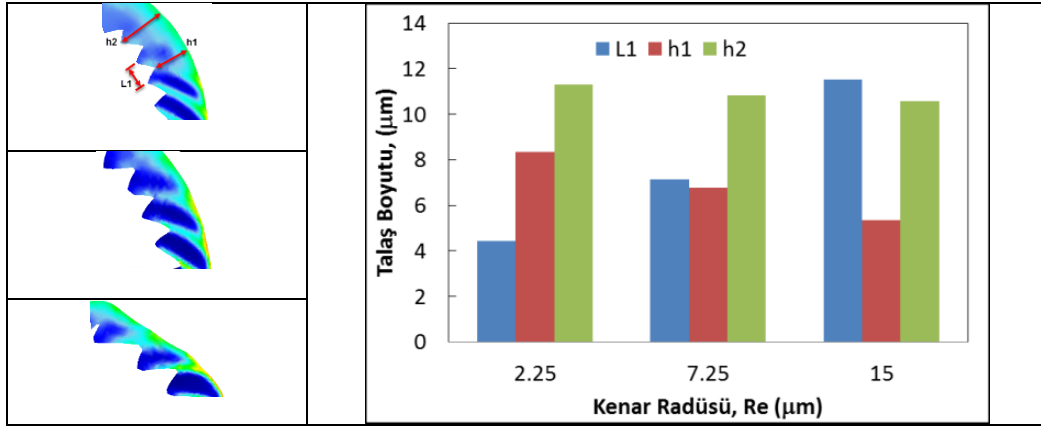


Şekil 4: Farklı kenar radyüslerine göre takım gerilmeleri değişimi.

3.3 Kenar Radyüsünün Talaş Formu Üzerindeki Etkisi

Özellikle mikro kesme işleminde, kenar radyüsü, talaş oluşum mekanizmasını doğrudan etkiler. Artan kenar radyüsü, kesicinin, iş parçasına dalmasını zorlaştıracığı için kesme kuvvetleri artarken, talaş şekli de değişecektir. Şekil 5 te sabit ilerleme değeri ($f=10\mu\text{m}$) ve sabit kesme hızında ($V=100\text{m/dk}$), farklı kenar radyüslerinin talaş formu üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekil 5 te, oluşan testere tipi talaş formunda maksimum yükseklik, h_2 , minimum yükseklik, h_1 , ve adım, L_1 ile ifade edilmiştir. Artan kenar radyüsü ile birlikte L_1 değeri de artmaktadır. Bir anlamda, talaşın segmentasyonu (birim zamanda oluşan diş sayısı) azalmaktadır. Bu durum, Şekil 5 teki talaş formundan da görülmektedir. Segmentasyonun artması, kesme kuvvetinin minimum ile maksimum değerleri arasındaki zaman aralığının artması anlamına gelir ki bu

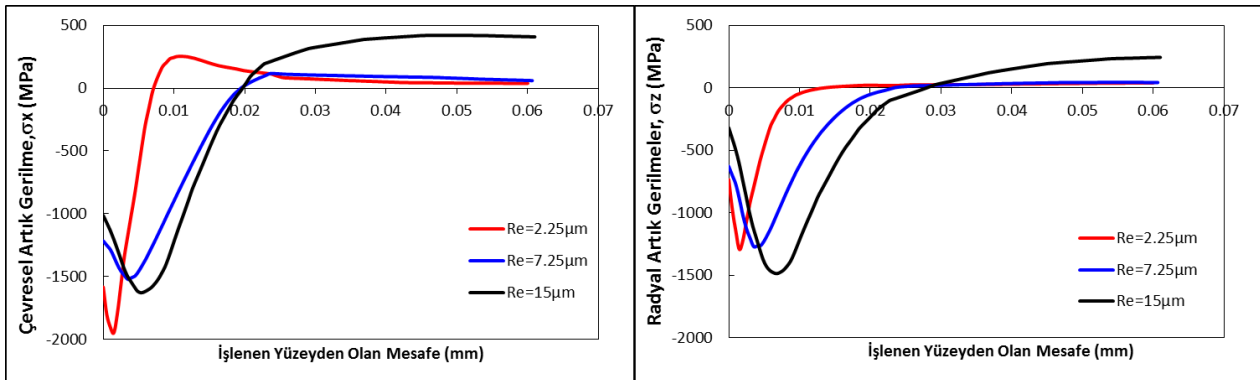
aslında kesme kuvvetlerini çok etkilemez. Artan kenar radyüsü, negatif bir talaş açısı etkisi oluşturmak suretiyle, kayma açısının da değişmesine neden olmuştur. Artan radyüsü, h_1 değerinin azalmasına neden olurken, h_2 değeri neredeyse sabit kalmıştır.



Şekil 5: Farklı kenar radyüslerine bağlı olarak, talaş formundaki değişim.

3.4 Yüzey Altı Artık Gerilmeler

Talaşlı imalat sonrası, yüzey altında meydana gelen çekme gerilmeleri, yorulma ömrü açısından arzu edilmez. Bu nedenle, imalat sonrasında, yüzey altındaki artık gerilmelerin hem yönü (basma veya çekme) hem de büyüklüğü dikkate alınmalıdır. Fakat artık gerilmelerin tayini çok kolay olmamakla beraber, oldukça da pahalı bir işlemdir. Bu çalışmada, kesme kuvvetleri açısından, kullanılan malzeme modelinin doğruluğu ortaya konulduktan sonra, artık gerilmelerde elde edilmiştir. Fakat, elde edilen artık gerilmelerin, deneysel doğrulaması yapılamamıştır. Şekil 6 da, $f=10\mu\text{m}$ ve $V_c=100\text{m/dk}$ için, çevresel ve artık gerilmelerin, işlenen yüzeyden olan derinliğe bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil 6 dan da görüldüğü üzere, işlenen yüzde meydana gelen hem çevresel hem de radyal artık gerilmeler ağırlıklı olarak basma yönündedir. Elde edilen bu sonuçlar, literatürde yapılan çalışmalarla da [9-11] benzerlik arz etmektedir. Fakat kenar radyüsüne bağlı olarak basma gerilmesinin yönü çekmeye de dönüşebilmektedir. $Re = 2,25\mu\text{m}$ için, hem çevresel hem de radyal yönde meydana gelen gerilmeler $10\mu\text{m}$ derinliğinde meydana gelmektedir. Artan kenar radyüsü ile birlikte, çevresel artık gerilmeler bir miktar azalırken, radyal yöndeki gerilmeler bir miktar artmaktadır. Ayrıca her iki durumda da, basma gerilmeleri $20\mu\text{m}$ derinliğinde etkili olmaktadır. Artan kenar radyüsü, hem çevresel hem de radyal yönde, çekme artık gerilmelerine de neden olmaktadır. Özellikle $Re = 15\mu\text{m}$ için, $20\mu\text{m}$ derinliğinden sonra çekme yönünde artık gerilmeler oluşmaktadır. Fakat $Re \leq 7,25\mu\text{m}$ için $20\mu\text{m}$ dan sonra meydana gelen çekme gerilmeleri daha düşük seviyelerdedir.



Şekil 6: Farklı kenar radyüslerine göre yüzey altında meydana gelen artık gerilmelerin değişimi.

4 Sonuç

Bu çalışmada, mikro tornalama işleminde, ilerleme hızının ve takım kenar radyüsünün, kesme kuvvetleri, talaş formu, takım gerilmeleri ve yüzey altı artık gerilmeleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Artık gerilmeler ve takım gerilmeleri, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Modellemede kullanılan malzeme modelinin doğruluğu, kesme kuvvetleri baz alınarak, ortaya konulmuştur. Çalışma sonrasında elde edilen ve öne çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Mikro tornalama işleminde kenar radyüsünün artması F_f/F_c oranının büyümesine neden olmaktadır. Bu oranın büyümesi ise, kesme işleminin kayma mekanizmasından daha çok kazınma mekanizmasıyla gerçekleştiğinin bir göstergesidir.
- Kenar radyüsünün artması takım ucu rijitliğini arttırdığı için takım gerilmelerinin azalmasına neden olmaktadır.
- Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında, yüzey altında meydana gelen artık gerilmeler, ağırlıklı olarak basma şeklindedir. Fakat artan kenar radyüsü, belirli derinlikte, bu gerilmelerin çekmeye dönmesine neden olmaktadır.
- Artan kenar radyüsü, işlenen geometrinin yorulma ömrünü olumlu etkileyebilir. Fakat yüzey pürüzlülüğü değişimi de dikkate alınmak suretiyle, nihai bir çıkarım yapılmalıdır.

5 Kaynakça

- [1] Aslantaş K., Şahan Ö., 2017 “Ti6Al4V alaşımının mikro işleme şartlarında yüksek hızda tornalanması”, 8.Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, s.101-110, Antalya.
- [2] Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., 2006, “Recent Advances in Mechanical Micromachining” *Annals of the CIRP*, Cilt: 55(2), s.745-768
- [3] Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissacco, G., 2003, “Micro Engineering” *Annals of CIRP*, Cilt 52(2), s.635-657.
- [4] Ucu I., Aslantaş K., Bedir F., 2013, “ An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy”, *Wear*. 300, 8–19.
- [5] Thepsonthi T., Özel T., 2012, “Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy”, *Int J Adv Manuf Tech* 63, 903–914. 32.
- [6] Bajpai V., Kushwaha AK., Singh RK., 2013, “Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micromilling of Titanium Alloy (Ti6Al4V)”. *Micro and Nano Technol; Sustainable Manuf* 2 10-14.
- [7] Niesłony P., Grzesik W., Laskowski P., Sienawski J., 2014, “Numerical and Experimental Analysis of Residual Stresses Generated in the Machining of Ti6Al4V Titanium Alloy”, *Procedia CIRP*. 13, 78–83.
- [8] Özel T., Ulutan D., 2012, “Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 61, 547–550.
- [9] Abboud E., Shi B., Attia H., Thomson V., Mebrahtu Y., 2013, “Finite element-based modeling of machining-induced residual stresses in Ti-6Al-4V under finish turning conditions”, in: *Procedia CIRP*, pp. 63–68.
- [10] Afazov S., Ratchev S., Becker A., Liu S., Segal J., Numerical analyses of turning-induced and mapped Ti6Al4V residual stresses for a disc subjected to centrifugal loading, *International Journal of Automation Technology*. 5 (2011) 326–333.
- [11] Ratchev S.M., Afazov S.M., Becker A.A., Liu S., 2011, “Mathematical modelling and integration of micro-scale residual stresses into axisymmetric FE models of Ti6Al4V alloy in turning, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*”. 4, 80–89.
- [12] Ducobu F., Riviere-Lorphevre E., Filippi E., 2017 “On the importance of the choice of the parameters of the Johnson-Cook constitutive model and their influence on the results of a Ti6Al4V orthogonal cutting model” *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 122, Page 143-155
- [13] Yang D., Zhanqiang L., 2016, “Quantification of Microstructural Features and Prediction of Mechanical Properties of a Dual-Phase Ti6Al4V Alloy” *Materials*, 9, 628