



Çok Ölçekli Malzeme Modellemesi Yoluyla Talaşlı İmalat Çıktılarının Daha Kapsamlı Ve Doğru Analizi

Program Kodu: 3001

Proje No: 118M253

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Burak BAL

Araştırmacı(lar):

-

Danışman(lar):

-

Bursiyer(ler):

Rıdvan BÜYÜKÇAPAR

KASIM 2020
KAYSERİ



ÖNSÖZ

Son yıllarda ülkelerin dünya üzerinde önemli ve gelişmiş konuma sahip olabilmesi, ülkelerin sahip oldukları teknolojik güç ve geliştirdikleri teknolojiler ile doğrudan ilişkili hale gelmiştir. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde endüstri 4.0'a geçiş süreçleri hızla devam etmektedir. Endüstri 4.0'ın en ana bileşenlerinden birini oluşturarak, gerçek bir sistemi henüz uygulamada kurmadan simülasyonlarını yapılarak oluşturulan sistemlerde, gereksiz maliyetlerden ve zaman kayıplarından kurtularak, daha hızlı ve ucuz bir yol ile daha işleme başlamadan sonuçlara ulaşabilmektedir.

Bu projede farklı malzeme malzemelerin talaşlı imalat simülasyonlarının hata payını büyük ölçüde azaltarak daha doğru sonuçlar almayı sağlayacak bir yöntem geliştirilmiştir. Üzerinde çalışılan malzeme savunma sanayi, uzay-havacılık ve otomotiv için kullanılan ve ileride kullanım alanı daha da genişleyebilecek olan Inconel 718 süper alaşımıdır. Inconel 718 süper alaşımının talaşlı imalat sonucunda yüzeyinde oluşan kalıntı gerilimler, sertlik değişimleri ve kesici takımında oluşan aşınmalar deneysel olarak kesme işlemi uygulanarak incelenmiştir. Talaşlı imalat simülasyonları için kullanılan Deform 2D programına klasik Johnson-Cook malzeme modeli tanıtılarak ve kristal plastisite tabanlı çok ölçekli malzeme davranışı tanıtılarak iki farklı modelleme yapılmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları, deneysel olarak gerçekleştirilen kesme işlemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kesme simülasyonlarında kullanılan malzeme modellerinde ölçek ne kadar küçültülür ise, deneysel sonuca o kadar daha fazla yaklaşılabileceği gözlemlenmiştir. Spesifik olarak, mikro ölçekte kristal plastisite tabanlı malzeme modeli ile yapılan simülasyonlar, makro ölçekte klasik Johnson-Cook malzeme modeli ile yapılan simülasyonlara göre daha başarılı sonuçlar vermiştir ve bize yeni nesil mikroyapı tabanlı imalatın, talaşlı imalatta maliyetin azaltılabilmesi için ne kadar önemli bir rol üstlendiğini göstermiştir.

TÜBİTAK tarafından 118M253 kodlu ve “**Çok Ölçekli Malzeme Modellemesi Yoluyla Talaşlı İmalat Çıktılarının Daha Kapsamlı Ve Doğru Analizi**” başlıklı bu projede ortaya konulan çalışmanın ve elde edilen çıktılarının günümüzde devam eden çalışmalara yardımcı olacağına ve ayrıca gelecekte yapılacak olan çalışmalara da fayda sağlayacağına inanılmaktadır. Bu çalışmanın gerçekleşmesi için gerekli maddi desteği sağlayan TÜBİTAK'a ve araştırmada emeği geçen herkese teşekkürü borç biliriz.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
TABLO LİSTESİ	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3.GEREÇ VE YÖNTEM	6
3. 1 Deneysel Yöntemler	6
3.1.1 Talaşlı İmalat Deneyleri.....	6
3.1.2 Çekme Deneyleri.....	7
3.2 Hesaplamalı Yöntemler	8
3.2.1 Kristal Plastisite Yöntemi.....	8
3.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi	11
4.BULGULAR	18
4.1 Deneysel Bulgular	18
4.1.1 Kesme Kuvveti Bulguları.....	18
4.1.2 Kalıntı Gerilim Bulguları	21
4.1.3 Kesici Takım Aşınma Bulguları.....	24
4.1.4 Sertlik Ölçüm Bulguları.....	26
4.1.5 Çekme Testi Bulguları.....	27
4.2 Modelleme Bulguları	28
4.2.1 Kristal Plastisite Modellemesi	28
4.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi	31
5. SONUÇ	45
KAYNAKLAR	46



TÜBİTAK

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Talaşlı imalat simülasyonlarında kullanılan bazı malzeme modelleri ve formülasyonları.	4
Tablo 2. Inconel 718 Johnson Cook malzeme modeli parametreleri	11
Tablo 3. 60 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.	18
Tablo 4. 30 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.	19
Tablo 5. 15 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.	20
Tablo 6. 60 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.	21
Tablo 7. 30 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.	22
Tablo 8. 15 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.	22
Tablo 9. 60 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.....	23
Tablo 10. 30 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.....	23
Tablo 11. 15 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.....	23
Tablo 12. Farklı ilerleme hızları ile kesilen numunenin Von Mises gerilme değerleri.....	24
Tablo 13. 60 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri.....	26
Tablo 14. 30 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri.....	27
Tablo 15. 15 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri.....	27



Tablo 16. In 718 Voce sertleşme parametreleri	28
Tablo 17. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)	31
Tablo 18. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı)	32
Tablo 19. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)	33
Tablo 20. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)	41
Tablo 21. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı)	42
Tablo 22. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)	43



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Çok ölçekli malzeme modellemesi zaman-boyut grafikleri.	2
Şekil 2. Fiziksel yaklaşım ve çok ölçekli modelleme yaklaşımının şekilsel ifadesi.....	3
Şekil 3. Talaşlı imalat deney düzeneği.	7
Şekil 4. 60 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.	19
Şekil 5. 30 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.	20
Şekil 6. 15 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.	21
Şekil 7. 60 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü	25
Şekil 8. 30 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü	25
Şekil 9. 30 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü	26
Şekil 10. Inconel 718 süper alaşımının mekanik davranışı.	28
Şekil 11. Inconel 718 süper alaşımının kristal plastisite modellemesi	29
Şekil 12. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı).	32
Şekil 13. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı).	33
Şekil 14. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı).	34



Şekil 15. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)42

Şekil 16. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı).43

Şekil 17. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroselik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)44

İnconel 718 savunma sanayi, uzay-havacılık ve otomotiv için kullanılan ve ileride kullanım alanı daha da genişleyebilecek olan süper alaşımdır. Bu projede Inconel 718 süper alaşımının talaşlı imalat sonucunda yüzeyinde oluşan kalıntı gerilimler, sertlik değişimleri ve kesici takımında oluşan aşınmalar gözlenmiştir. Talaşlı imalat simülasyonları için kullanılan Deform 2D programına, klasik Johnson-Cook malzeme modeli yerine, kristal plastisite tabanlı çok ölçekli malzeme davranışı tanıtılarak daha kapsamlı ve deneysel veriye daha yakın analizler yapılmıştır. Bu konunun seçilme nedeni, gerçek deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilip beklenmedik üretim hataları ve denemeleri en aza indirebilecek bir yöntem geliştirmektir. Bugüne kadar gerçekleştirilen talaşlı imalat simülasyonlarında malzeme davranışı genellikle tek ölçekli gerinim pekleşmesi, gerinim hızı pekleşmesi ve sıcaklık yumuşamasını kapsayan Johnson-Cook malzeme modelleri ile gerçekleştirilmiştir ve bu modeller malzemelerin mikroyapısal girdilerini içermemektedir. Bu projede ise Johnson-Cook malzeme modeli ile ve karşılaştırmalı olarak çok ölçekli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli ile 2D deform programında farklı kesme hızlarında ve farklı ilerleme hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu projede ilk olarak, Inconel 718 malzemesinin talaşlı imalat deneylerini yapılarak sonuçları gözlenmiştir. Daha sonra Johnson-Cook malzeme modellemesiyle gerçekleştirilen simülasyon sonuçları gözlenmiştir. Son olarak da Inconel 718 süper alaşımının kristal plastisite modelinin yapılması ve mikroyapı girdileri ile elde edilen kristal plastisite modeli ile çıkarılan çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışının Deform 2D simülasyonlarına tanıtılarak simülasyonu gerçekleştirip, elde edilen sonuçlar gözlenmiştir. Yapılan simülasyonlar ve deney sonucunda, iki farklı malzeme modelin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Mikroyapı girdileri ile elde edilen kristal plastisite modeli ile çıkarılan çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışının, tek ölçekli malzeme davranışı ile karşılaştırıldığında deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylelikle çok ölçekli malzeme modellemesiyle gerçekleştirilen simülasyonların daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar gösterdiği kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Johnson Cook, Kristal Plastisite, Deform 2D, Sonlu elemanlar analizi



ABSTRACT

Inconel 718 is a superalloy that is used in defense, aerospace and automotive industries, and the area of useage can be expanded in the future. In this project, residual stresses, hardness changes and wear on the cutting tool were observed on the surface of the Inconel 718 superalloy after machining. Crystal plasticity based multi-scale material behavior instead of the classical Johnson-Cook material model has been introduced to the Deform 2D program, which is used for machining simulations, to get more comprehensive and accurate results. The reason for choosing this topic is to develop a method that can achieve results closer to real experimental results and minimize unexpected manufacturing errors and trials. In the classical machining simulations, Johnson-Cook material models has generally been used, which generally include single-scale strain hardening, strain rate hardening, and temperature softening effects, and these models do not include the microstructural inputs of the materials. In this project, simulations at different cutting speeds and different feed rates were carried out in the Deform 2D program using both Johnson-Cook material model and crystal plasticity-based material model. In this project, firstly, machining of Inconel 718 material was performed, and the results were obtained. Then, the machining simulation were conducted with Johnson-Cook material model. Finally, the crystal plasticity model of the Inconel 718 superalloy was made and machining simulations were carried out based on this material model. As a result of the simulations and experiments, two different material models were compared with the experimental results. It was observed that the crystal plasticity based multi-scale and multi-axial material model gave closer results to the experimental results when compared with the Johnson-Cook material model. Thus, it has been proven that simulations performed with multi-scale material modeling show more realistic and reliable results.

Keywords: Johnson Cook, Crystal Plasticity, Deform 2D, Finite Element Analysis



TÜBİTAK

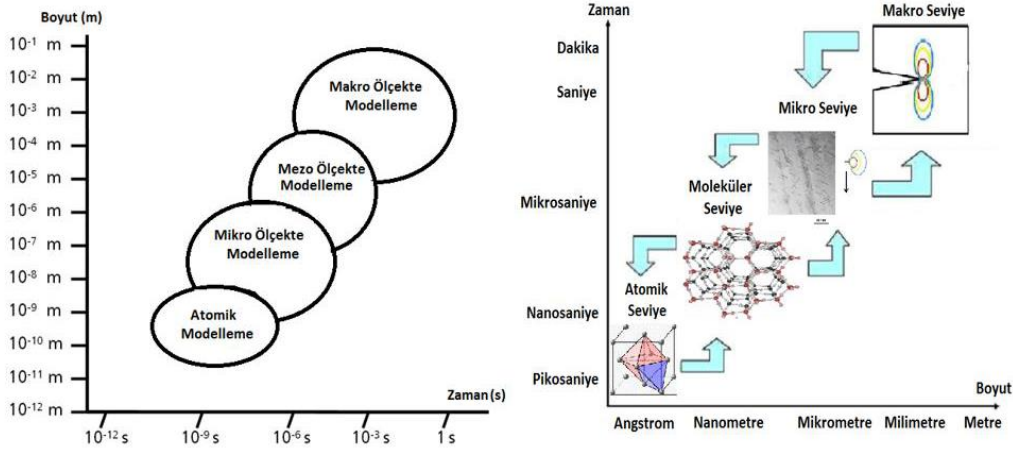
1.GİRİŞ

Çok çeşitli alaşım bileşimlerine sahip nikel bazlı süper alaşımlar, sahip oldukları üstün mekanik özellikler ve yüksek sıcaklıklarda bu mekanik performanslarını koruyabilmeleri sayesinde, uzay-havacılık, türbin kanatları, jet motorları gibi alanlarda kendilerine yer bulmuştur (Amato, Gaytan, Murr, Martinez, & Shindo, 2012).Yüksek mukavemete sahip Nikel bazlı bir alaşım olan Inconel 718, genel olarak uçak endüstrisinde kullanılmaktadır. Inconel 718 alaşımı, yüksek akma mukavemeti (700-1200 MPa), çekme mukavemeti (900-1600 MPa), yüksek korozyon ve oksidasyon direnci gibi mekanik özelliklere sahiptir ve bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmektedir. Fakat, alaşımın deformasyon sırasındaki yüksek gerinim sertleşmesi değerleri ve yüksek tokluğu sebebiyle, Inconel 718 işlenmesi zor bir malzemedir (Rahman, Seah, & Teo, 1997). Bu sebeple, Inconel 718 alaşımının işlenmesinden önce uygun girdilerin simülasyonlar yardımı ile bulunup istenilmeyen yüzey kusurlarının olmamasını sağlamak ve yüzey bütünlüğü sağlam olan bir malzeme açığa çıkarmak çok önemlidir.

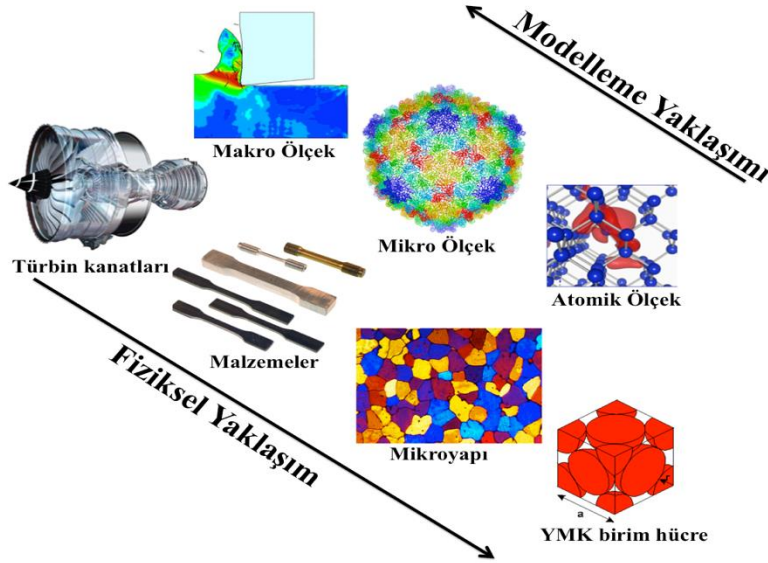
Talaşlı imalat suresi boyunca malzemeler yüksek sıcaklıklara altında deformasyona uğrar ve talaş kaldırma işlemi gerçekleşir. Deformasyon sırasında oluşan dislokasyonlar kritik tane sınırlarına dayandığında veya geçtiğinde malzeme üzerinden yeniden dinamik kristalleşme meydana gelir ve bu da, işlenmiş yüzeyde tanecik kaybına neden olur (Jawahir et al., 2011). Kesme işlemi suresi boyunca meydana gelen mikroyapısal değişiklikler direkt olarak malzemenin mekanik performansını ve servis kalitesini belirlemektedir (Rotella, Dillon, Umbrello, Settineri, & Jawahir, 2013). Bu sebep ile, malzeme mikroyapısının da talaşlı imalat simülasyonlarına katılması büyük önem içermektedir. Bu projede, deneysel aşamada Inconel 718 alaşımına farklı kesme hızlarında kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve yüzeyinde oluşan kalıntı gerilim, kesme takımında oluşan aşınma ve sertlik değişimleri gözlemlenmiştir. Ayrıca deneysel olarak gözlemlenen bu çıktıların, talaşlı imalat simülasyonları Deform2D programı ile gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalat simülasyonları 2 farklı malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriye daha yakın sonuç veren malzeme modelleri geliştirmek, doğru simülasyonların yapılıp, üretim hatalarının önüne geçilmesi ve maliyet kazanımı sağlanması açısından son derece önemlidir. Talaşlı imalat sırasında oluşan kalıntı gerilim ve takım aşınmaları ile birlikte malzemedeki sertlik değişimi talaşlı imalatı yapılan malzemenin yüzey bütünlüğünü ve kalitesi, boyutsal doğruluğunu ve kesici takım ömrünü etkileyen en önemli faktörler olduğundan bu çıktılara yoğunlaşılmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modeli, gözlemi yapılacak çıktılar için çok kritik bir girdidir. Özellikle malzeme modelinin ölçeği ne kadar küçültülüp ne kadar mikroyapısal girdi

artırılır ise o kadar başarılı simülasyon sonuçları alınabilecektir. Ayrıca, farklı ölçeklerin birbirleri ile bağlantısının başarılı bir şekilde sağlanması ve çok ölçekle malzeme modellemesi ile de başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Farklı ölçekteki bağlantıların kurulması (Şekil 1), spesifik bir olayın farklı ölçeklerde farklı sonuçlara yol açabileceği için önem arz etmektedir. Örneğin, mikro ölçekte yumuşamaya sebebiyet verebilecek bir olay, makro ölçekte pekleşmeye sebep olabilir. Sonuç olarak, farklı problemler için farklı ölçeklerdeki malzeme modellerinin başarıları, o problemin gerçekleştirilmeden önce şartlarının belirlenmesi için önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen proje kapsamında da, bu problem talaşlı imalat olarak seçilmiştir ve projenin araştırma sorusu: “Talaşlı imalat sonlu elemanlar simülasyonlarında klasik malzeme davranışı modelleri yerine kristal plastisite tabanlı çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışı modeli kullanılarak çıktılar deneysel verilere daha çok yaklaştırılabilir mi ve bu sayede istenilmeyen üretim hatalarının önüne geçerek maliyet kazanımı sağlanabilir mi?” olarak karşımıza çıkmıştır. Fiziksel yaklaşım ve çok ölçekli modelleme yaklaşımının şekilsel ifadesi şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Çok ölçekli malzeme modellemesi zaman-boyut grafikleri.



Şekil 2. Fiziksel yaklaşım ve çok ölçekli modelleme yaklaşımının şekilsel ifadesi.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Süper alaşımlar, yüksek mukavemet ile birlikte süneklik beraberliği, korozyona ve oksidasyona karşı yüksek direnç gösterip, üstün mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmelerinden dolayı uzay-havacılık, enerji, ulaştırma gibi kritik sektörlerde kullanılmaktadırlar (Geng et al., 2017; Lee & Kao, 2014). Süper alaşımların sahip oldukları üstün mekanik özelliklerin sebepleri sahip oldukları mikroyapı ve katı çözelti sertleşmesi, ikincil faz çökeltilerinin oluşturan çökertme sertleşmesi gibi pekleşme mekanizmalarıdır. Süper alaşımlar, kimyasal kompozisyonlarında, Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) elementlerini ana element ve kromiyum (Cr), alüminyum (Al), titanyum (Ti), tungsten (W), niyobyum (Nb) gibi elementleri alaşım elementleri olarak bulundurmaktadırlar. Proje kapsamında çalışılan malzeme olan Inconel 718, Ni bazlı, yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip bir süper alaşımdır. Mekanik performansı yüksek bu süper alaşımın talaşlı imalat süreçleri zordur. Özellikle, talaşlı imalat süreçlerini, yüzey sağlamlığını olumsuz yönde etkilemeyecek bir kalıntı gerilim ile, kesici takım yüzeyinde çok aşınma oluşmadan ve malzeme sertliği değişmeden tamamlamak zorlu bir süreçtir. Bu zorlu sürecin öncelikle bilgisayar ortamında simülasyonlarını yapmak, üretim denemelerinin önüne geçmekte ve maliyet kazanımına sebep olmaktadır. Spesifik olarak, bu simülasyonlar yardımı ile istenilen sonuca yönelik talaşlı imalat girdileri bulunabilmektedir ve bu simülasyonlar genellikle sonlu elemanlar analizi programları ile gerçekleştirilmektedir. Günümüze kadar Inconel 718 süper alaşımı için bir çok sonlu elemanlar analizi yapılmıştır ve bu simülasyonlarda kalıntı gerilimler, kesici takımda oluşan aşınmalar, talaşlı imalat süresince sıcaklık değişimleri ve talaş morfolojisi gibi çıktılar incelenmiştir (Balbaa & Nasr,

2015; Díaz-Álvarez, Cantero, Miguélez, & Soldani, 2014; Fan, Hao, Lin, & Yu, 2015; Kortabarria, Armentia, & Arrazola, 2016; Madariaga, Kortabarria, Hormaetxe, Garay, & Arrazola, 2016; Smith et al., 2017; Yan, Zhu, Zhuang, Zhang, & Ding, 2014; Zhao et al., 2017).

Sonlu elemanlar analizi sonuçlarında kullanılan malzeme modeli, gözlemlenen sonuçların doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir. Kullanılan malzeme modelinin ölçeği ne kadar küçültülürse, ne kadar fazla farklı ölçekte aynı problem çalışılır ve bu ölçeklerin bir birleri ile bağlantıları kurulur ise ve malzeme mikroyapısal girdileri malzeme modeline katılır ise o modelin sonlu elemanlar analizinde daha doğru sonuçlar vereceği literatürde farklı problemler için kanıtlanmış durumdadır (Onal, Bal, Canadinc, & Akdari, 2015; Onal et al., 2014). Talaşlı imalat simülasyonlarında da, bir çok farklı model literatürde aktif olarak kullanılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Talaşlı imalat simülasyonlarında kullanılan bazı malzeme modelleri ve formülasyonları.

Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Malzeme Modeli	Yorumlar
$\sigma = K\varepsilon^n$	Hollomon kuralı, düşük gerinimlerde başarısız ve sadece gerinim sertleşmesini içermekte (Dixit, Joshi & Davim, 2011)
$\sigma = \sigma_y + K\varepsilon^n$	Ludwik kuralı, geniş gerinim aralığında başarılı sonuçlar sergilememekte ve gerinim sertleşmesi içermekte (Dixit et al., 2011)
$\sigma = \sigma_y + K[1 - me^{-n\varepsilon}]$	Klasik Voce denklemi. Mikro ölçekteki Voce denklemi kristal plastisite simülasyonlarında kullanılmakta (Voce, 1948)
$\sigma = k\varepsilon^n \exp\left(\frac{\beta}{T}\right)$	Gerinim hızı, sıcaklık ve gerinim hızı hassasiyeti bu denklem ile modele tanıtılmıştır (Dixit et al., 2011)
$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-r}$	Power kuralı, geniş gerinim aralığında Hollomon ve Ludwik kurallarına göre daha başarılı sonuçlar sunmaktadır (Dixit et al., 2011)
$\sigma_{JC} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)$	Klasik Johnson-Cook malzeme modeli. Talaşlı imalat simülasyonlarında en fazla kullanılan malzeme modeli, gerinim pekleşmesi, gerinim hızı pekleşmesi ve sıcaklık yumuşamasını içermektedir (Klocke et al., 2013)
$\sigma = \sigma_{JC} \left(D + (1 - D) \tanh\left(\frac{1}{\varepsilon + \varepsilon_a}\right)\right)$	TanH malzeme modeli. Klasik Johnson-Cook malzeme modeline gerinim yumuşaması katkısının eklenmesi ile türetilmiştir (Calamaz et al., 2008).
$\sigma = \sigma_a + \beta \exp(-\beta T) + \beta_0 \sqrt{\varepsilon_p} \exp(-\alpha T)$	Zerilli-Armstrong malzeme modeli. Malzeme fiziğinin ve mikroyapısının en temel seviyede tanıtıldığı modelledir (Rui Liu et al., 2013a)
$\sigma = \sigma_a + (S_i \sigma_i + S_e \sigma_e) f(\mu)$	Mekanik Gerilim Limit Değeri modeli. Sıcaklığa bağımlı gerilim terimini ve mikroyapısal olarak dislokasyon-dislokasyon etkileşimi terimini kapsamaktadır (Rui Liu et al., 2013a).
$\sigma = \left(A + B \left(1 - \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{\ln D_0}\right)^{n_1} \varepsilon^{n_0}\right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^C \left(\frac{T_m - T}{T_m - T}\right)^m$	Khan-Huang Liang modeli. Malzemelerin termo-mekanik davranışlarını belirlemek için kullanılmaktadır (Chen, Ren, Qin & Li, 2015)
$\sigma = \alpha_\rho \mu b \sqrt{\rho} + \alpha_G \mu \sqrt{\frac{b}{D}} + \left[1 - \left(\frac{kT}{g_0 \mu b_3} \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right)^{\frac{1}{q}}\right]^{1/p} \sigma_0$	Aktivasyon enerjisi, enerji bariyer modeli, kesme modülüsü, burger vektörü değeri gibi malzeme fiziğine dayalı malzeme modeli. sıcaklığa bağlı ve sıcaklığa bağlı olmayan gerilim terimlerinin toplamı ile bulunmuştur (R Liu et al., 2014)

$\sigma = \sum_i \sigma_i \left(1 - \left(kTQ_i^{-1} \log \left(\frac{\dot{\epsilon}_{0i}}{\dot{\epsilon}^p} \right) \right)^{\frac{1}{q_i}} \right)^{1/p_i} + \alpha_p \mu b \sqrt{\rho} + \alpha_{HP} \mu \sqrt{b/d} + \tau_d (1 - \exp(-\alpha_d \dot{\epsilon}^p))$	Malzeme mikroyapısını en geniş şekilde kapsayan malzeme modeli. Dislokasyon tabanlı deformasyon mekanizmaları, tane sınırı kaymaları, tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu gibi terimleri kapsamaktadır (Fernandez-Zelaia et al., 2017).
--	--

Inconel 718 üzerine yapılan çalışmalarda, ortogonal kesiminden sonra oluşan artık kalıntı gerilimin ve termomekanik fenomenyanasının tahmin edilebilmesi için, değiştirilmiş Algarni ve Sjoberg plastisite modellerini de içeren modife edilmiş Mohr Coulomb modeli kullanılarak ABAQUS programında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar göstermektedir ki deneysel kesme kuvveti sonuçları ve simülasyon sonrası elde edilen sonuçlar arasındaki fark yüzde 10 civarındadır. Artık kalıntı gerilimi ise klasik Johnson-Cook malzeme modellemesine göre yapılan simülasyonlarla kıyaslandığında deneysel artık kalıntı gerilimine daha yakın sonuçlar vermiştir (Da Silva, Denguir, & Outeiro, 2020). Sünek kırılmanın talaş oluşumundaki etkisi, sürekli hasar azaltma modeli ve hasar düşürme modeli Deform 2D sonlu elemanlar analizi programında karşılaştırılarak incelenmiştir. Başka bir çalışmada, Inconel 718 alaşımının, kaplamasız karbür kesici takımlarla işlenmesi ve birleştirilmiş Eulerian ve Lagrangian modeli kullanılarak, simule edilen parçalı çipin yüzey bütünlülüğü üzerindeki artık kalıntı gerilimleri ve yüzey topografyası incelenmiştir. Oluşturulan yüzey bütünlülüğü bölümlenmiş bir dalgalı yüzey ve döngüsel artık gerilimi dağılımıyla ayrılmış çipde bulunur (Y. Liu et al., 2020). Inconel 718 metal işleme sıvısı ve krijojenik soğutma koşulları altında delme işlemi yapıldıktan sonra oluşan takım aşınması ölçülmüştür. Artımlı Lagrange modeli ve keyfi-Lagrangian-Eulerian yaklaşımları kullanılarak takım aşınma simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara yakınlık göstermektedir (Journal, Liu, Wu, Li, & Cheng, 2020) Inconel 718 gibi alaşımların işlenebilirliği farklı kesme koşulları kullanılarak geliştirilebilir. Farklı kesme hızlarında ve farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirilen kesme işlemi sonuçları krijojenik tornalama, kuru ıslak tornalamaya oranla yüzde 8 ile yüzde 17 arasında daha az enerjiyle kesme işlemi gerçekleşmiştir. Ayrıca, krijojenik tornalama da yüzey pürüzlülüğü de yüzde 20'den daha fazla azaldığı gözlenmiştir. Kullanılan bu yöntem sayesinde daha uzun takım ömrü ve daha az enerji tüketimi sağlanmıştır (Khanna, Agrawal, Dogra, & Iulian, 2020). Elasto-plastik bir kristal plastisite modeli, doğrudan metal lazer eritme işlemine bağlı olarak sıcaklık değişimiyle ortaya çıkan deformasyonu tahmin edebilmek için genişletilerek yeni malzeme modelleri oluşturulmuştur. Geliştirilen malzeme modelleri ile gerçekleştirilen simülasyonlar, deneysel veri değerleriyle yakınlık göstermektedir (Ghorbanpour et al., 2019).



3.GEREÇ VE YÖNTEM

Önerilen proje, farklı malzeme modellemeleri ile yapılacak talaşlı imalat simülasyonları ile talaşlı imalat çıktılarını karşılaştırmak ve talaşlı imalat simülasyonlarının hata payını azaltacak bir metodoloji geliştirmek üzerinedir. Bu geliştirilecek metodoloji ile yüzey kalitesi, takım ömrü, sertlik değişimleri açısından doğru talaşlı imalat girdileri seçilebilecek ve üretim denemeleri ve maliyet azaltılacaktır. Bu amaçlar doğrultusunda projede deneysel ve hesaplamalı yöntemler kullanılmıştır.

3. 1 Deneysel Yöntemler

3.1.1 Talaşlı İmalat Deneyleri

Bu kalemde, Inconel 718 malzemesinin talaşlı imalat deneyleri İstanbul'da Maxima şirketinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan kesme işlemi sırasında dinamometre yardımı ile kesme kuvvetleri de gözlemlenebilmiştir. Spesifik olarak, 3 adet Inconel 718 silindirik malzemesinin talaşlı imalat deneyleri farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalat işlemi yapılan malzemeler, 15 m/dak, 30 m/dak, 60 m/dak hızlarda kesilirken, her bir numune için ilerleme hızları (devir başına ilerleme) sırası ile 0.04 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.06 mm/dev, 0.08 mm/dev, 0.09 mm/dev ve 0.1 mm/dev olmak üzere kesme işlemleri tamamlanmıştır. Bu işlemlerin yapıldığı deney düzeneği ve numuneler Şekil 3'de gösterilmiştir. Kesme işlemi Şekil 3'de görüldüğü üzere radyal kesme olarak yapılmıştır. Radyal kesme seçilmesinin sebebi ise modellemesi daha basit olan 2 boyutlu kesme ile radyal kesme işleminin simüle edilebileceği içindir. Şekil 3' de oluşan renk değişiminin sebebi, numune boyutu kısa geldiği için malzemenin sonuna yapılan sıkı geçirme işlemidir. Bu sayede malzeme tezgaha yerleştirilebilmiştir.



Şekil 3. Talaşlı imalat deney düzeneği.

Talaşlı imalat deneylerinin ardından, malzemedeki kalıntı gerilim gözlemi Abdullah Gül Üniversitesi Merkez Labaratuvar bünyesinde bulunan X-Ray Difraktometre (XRD, Bruker D8Discover) noktasal analizi yardımı ile belirlenmiştir. X ışınlarının kırınımdan yararlanılarak $\sin^2\psi$ metodu, eulerian cradle düzeneği ile kullanılmıştır. ψ açısı, malzeme içerisindeki kristal kafes ile X ışınlarının geldiği düzlem arasındaki açıyı belirtmektedir. Bu metotta malzemenin farklı ψ açılarında oluşturduğu tepe noktaları elde edilmekte ve her açı için hesaplanan kafesteki atom aralıkları belirlenerek kalıntı gerilim ve bu sayede kalıntı gerilim değerleri hesaplanmaktadır. Kesici takım aşınma gözlemleri taramalı elektron mikroskobu yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Numune aşınmalarının doğru analizi için her ilerleme hızı parametresinde yeni kesici uç kullanılmıştır. Oluşan aşınmaların incelenebilmesi için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri bütün kesme kenarını kapsayacak şekilde alınmıştır. Numunelerin makro ve mikro sertlikleri ise, talaşlı imalat deneyleri öncesi ve sonrası mikro/makro sertlik cihazları ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Çekme Deneyleri

IN 718 numunesinin malzeme davranışı oda sıcaklığında $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerilim hızında gözlemlenmiştir. Çekme testleri ISO 9892-1:2009 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Testlerden önce, deney numunesinin şekillendirme işlemleri sonucunda yüzeyinde oluşan kalıntı gerilimlerin en aza indirilmesi, yüzeyindeki mikro çiziklerin/çatlakların temizlenerek deney

sırasında uygulanan yük harici bir gerilim kaynağı olmaması ve sonuçta deformasyonsuz ve çiziksiz bir malzeme yüzeyi elde edilebilmesi için, standart zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.2 Hesaplamalı Yöntemler

3.2.1 Kristal Plastisite Yöntemi

Çekme testi yapılan Inconel 718 süper alaşımının, kristal plastisite modeli FORTRAN 77 dilinde yazılan VPSC (Visco-Plastic Self Consistent) kodu ile oluşturulmuştur. Bu kod kullanılarak malzemelerin plastik davranışlarını farklı ikizlenme, kayma sistemleri, tane etkileşimleri, hız gradyanları gibi girdilerle modellemek mümkündür.

VPSC modelinde bir veya daha fazla kayma ve ikizlenme sistemleri aktifken plastik deformasyonun başlaması için Schmid tensörüne (m_i^s) ve uygulanan gerilime (σ_i) bağlı olan kritik çözünmüş kayma gerilimine ulaşılması gerekmektedir:

$$(1) \quad \tau_{RSS}^s = m_i^s \sigma_i$$

Kritik çözünmüş kayma gerilimin bir fonksiyonu olarak da doğrusal olmayan kayma gerinimi elde edilebilir:

$$(2) \quad \dot{\gamma}^s = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau_{RSS}^s}{\tau_0^s} \right)^n = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{m_i^s \sigma_i}{\tau_0^s} \right)^n$$

Bu denklemde $\dot{\gamma}^s$ referans hızını, τ_0^s eşik gerilmeyi ve n hız hassasiyet indeksinin tersini belirtmektedir. Bütün kayma, ikizlenme sistemlerinden gelen kayma gerinim hızları kristaldeki toplam kayma gerinim hızını vermektedir. Bu değer aşağıdaki şekilde psödo doğrusal formda gösterilebilir:

$$(3) \quad \dot{\epsilon}_i = \left[\dot{\gamma}_0 \sum_1^s \frac{m_i^s m_j^s}{\tau_0^s} \left(\frac{m_k^s \sigma_k}{\tau_0^s} \right)^{n-1} \right] \sigma_j = M_{ij}^{c(sec)}(\tilde{\sigma}) \sigma_j$$

$M_{ij}^{c(sec)}$ değeri anlık olarak gerilim ve gerinim hızı ilişkisini belirtmektedir. Çok taneli malzemede denklem aşağıdaki şekildedir:

$$(4) \quad \dot{E}_i = M_{ij}^{(sec)}(\tilde{\Sigma})\Sigma_j + \dot{\Sigma}^0$$

\dot{E}_i çok taneli yapı gerinim hızı değerini ve Σ uygulanan gerilimi ifade etmektedir.

Kalıntı içeren kristal kafeslerde stress ve gerilim hızındaki sapma değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$(5) \quad \dot{\epsilon}_k = \dot{\epsilon}_k - \dot{E}_k$$

$$(6) \quad \tilde{\sigma}_j = \sigma_j - \Sigma_j$$

$\dot{\epsilon}_k$ ve σ_j değerleri sırasıyla bölgesel gerinim hızı ve gerilim değerlerini ifade etmektedir. Eshelby'nin homojen olmayan kalıntı formülü kullanılarak gerilim denklemi bulunabilir:

$$(7) \quad \dot{\epsilon} = -\tilde{M} : \tilde{\sigma}$$

Etkileşim tensörü \tilde{M} aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$(8) \quad \tilde{M} = n(1 - S)^{-1} : S : M^{(sec)}$$

$M^{(sec)}$ çok taneli çökeltiler için sekant uyum tensörünü ve S viskoplastik Eshelby tensörünü belirtmektedir.

Denklem 3 ve 4'ün denklem 7 ye uygulanmasıyla $M^{(sec)}$ değeri elde edilmektedir. Bütün tanelerdeki gerinim hızlarının ağırlıklı ortalaması ile makroskopik gerinim hızı bulunabilir:

$$(9) \quad M^{(sec)} = \langle M^{c(sec)} : (M^{c(sec)} + \tilde{M})^{-1} : (M^{(sec)} + \tilde{M}) \rangle$$

Denklem 3, 7 ve 9 un ardışık çözümleri uygulanan gerinim hızına karşılık gelen her tanedeki gerilim değerlerini, kristal uyum tensörünü ve çok taneli kristal uyum tensörünü vermektedir.

Genel dislokasyon yoğunluğu değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$(10) \quad \dot{\rho} = \sum_n \{k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho\} |\dot{\gamma}^n|$$

k_1 ve k_2 sabitleri istatikselsel olarak hareketli dislokasyon birikmesi için kullanılmaktadır. Taylor sertleşmesi formatında akış gerilimi aşağıdaki denklemde belirtilmiştir:

$$(11) \quad \tau - \tau_0 = \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

α dislokasyon etkileşim parametresini ve τ_0 tane boyutundaki deformasyonla alakalı referans kuvveti belirtmektedir. Bu denklemin zaman türevi τ_0 sabiti ile beraber akış gerilim hızını vermektedir:

$$(12) \quad \dot{\tau} = \frac{\alpha \mu b \dot{\rho}}{2 \sqrt{\rho}}$$

Denklemlerin 10'unun denklem 12'ye uygulanması aşağıdaki denklemi vermektedir:

$$(13) \quad \dot{\tau} = \sum_n \left\{ k_1 \frac{\alpha \mu b}{2} - k_2 \frac{\alpha \mu b}{2} \sqrt{\rho} \right\} |\dot{\gamma}^n|$$

Dislokasyon yoğunluğunun karekökü denklem 11 ile bulunmaktadır:

$$(14) \quad \sqrt{\rho} = \frac{\tau - \tau_0}{\alpha \mu b}$$

Bu denklemin 13'üncü denkleme uygulanması ile akış gerilim hızı bulunmaktadır:

$$(15) \quad \dot{\tau} = \sum_n \left\{ k_1 \frac{\alpha \mu b}{2} - k_2 \frac{(\tau - \tau_0)}{2} \right\} |\dot{\gamma}^n|$$

Denklemin 15'indeki $\left\{ k_1 \frac{\alpha \mu b}{2} - k_2 \frac{(\tau - \tau_0)}{2} \right\}$ ifadesi doğrusal Voce sertleşmesidir. Bununla beraber denklem 15 başka bir ifadeyle aşağıdaki şekilde gösterilebilmektedir:

$$(16) \quad \dot{\tau} = \sum_n \left\{ \theta_0 \left(\frac{\tau_s - \tau}{\tau_s - \tau_0} \right) \right\} |\dot{\gamma}^n|$$

Denklemden θ_0 sabit pekleşme hızını, τ_s eşik gerilimi ifade etmektedir. Malzemede sertleşme genişletilmiş Voce yasası ile tanımlanmaktadır. Her tane için biriken kayma geriliminin (Γ) eşik gerilime (τ^s) etkisiyle belirtilir:

$$(17) \quad \tau^s = \tau_0 + (\tau_1 + \theta_1 \Gamma) \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta_0 \Gamma}{\tau_1}\right)\right)$$

τ_0 referans kuvveti, τ_1 , θ_0 ve θ_1 sertleşme davranışını belirleyen parametrelerdir.

Kristal plasite simülasyonlarında malzeme dokusu (XRD ile belirlenmiştir) ve farklı hız gradyanları da girdi olarak kullanılmıştır. Kullanılan hız gradyanları, 4 Bulgular kısmında verilmiştir.

3.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi Deform 2D isimli programda yapılmıştır. Bu analizler için 2 farklı malzeme modeli kullanılmıştır. 1. si 3.2.1 başlığında anlatılan, malzeme mikroyapısını içeren, mikro öçekli kristal plasite tabanlı malzeme modeli, 2. si ise 18. denklemden yer alan makro ölçekli Johnson-Cook malzeme modelidir.

$$(18) \quad \sigma_{JC} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)$$

Bu model, gerinim pekleşmesini, gerinim hızı pekleşmesini ve sıcaklı yumuşamasını içermektedir. Tablo 2’de belirtilen Johnson-Cook malzeme parametreleri uygulanarak DEFORM 2D programında sonlu elemanlar simülasyonları yapılmıştır.

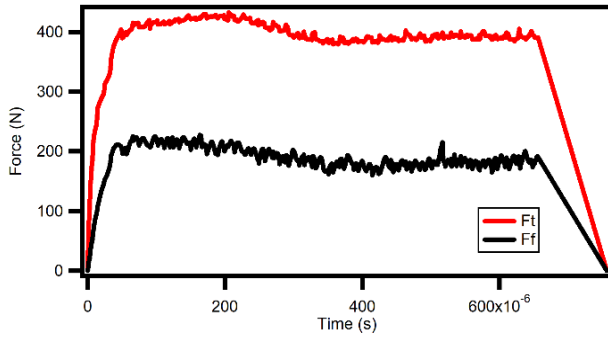
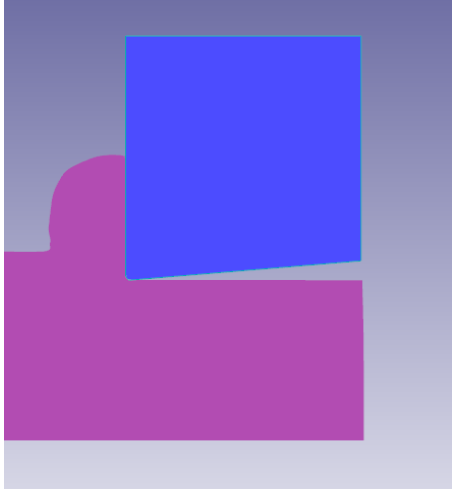
Tablo 2. Inconel 718 Johnson Cook malzeme modeli parametreleri.

A (MPa)	1012
B (MPa)	511
C	0.0271
n	0.396
m	4.33
T_r (C°)	20
T_m (C°)	1277

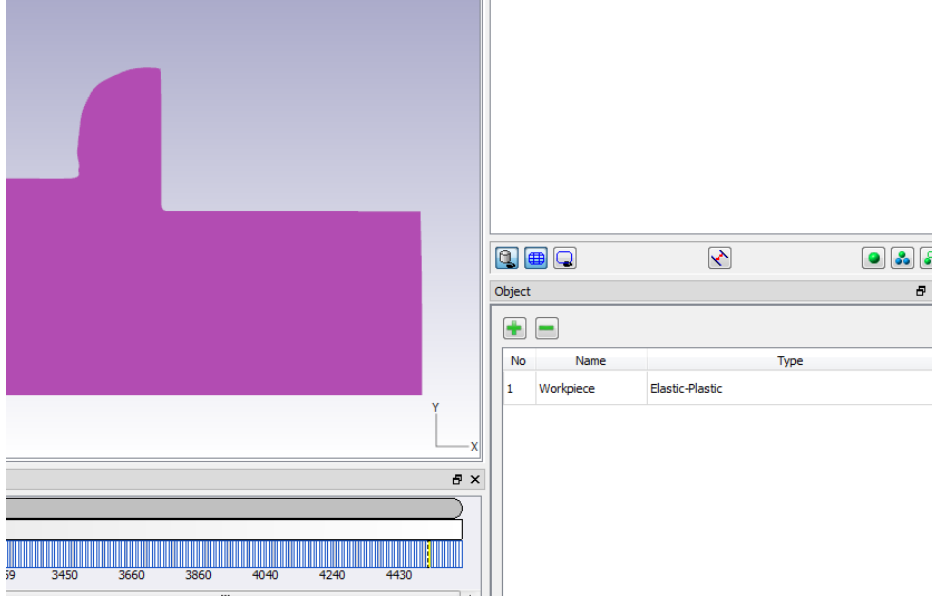
3.2.2.1 Kalıntı Gerilim Simülasyonları

Kalıntı gerilim hesaplamaları talaş kaldırma işlemi sonrası kesici takımın kaldırılıp, numune üzerine atılan bütün meshlerin oda sıcaklığına kadar soğumasının beklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Aşamaları sırasıyla aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

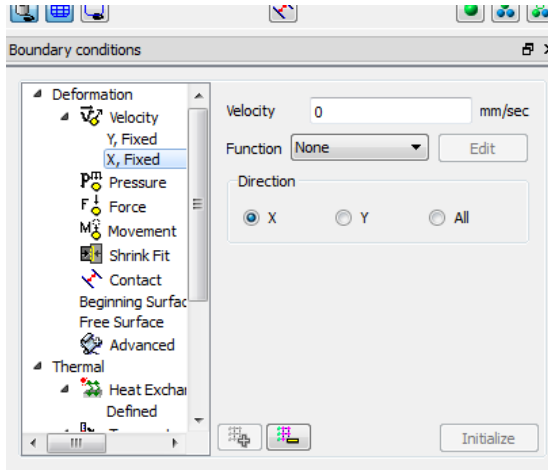
1) Örnek bir talaş kaldırma simülasyonu ve kuvvet değerleri takibi: Kuvvet değerleri kararlı duruma geldikten sonra simülasyon durdurulabilir.

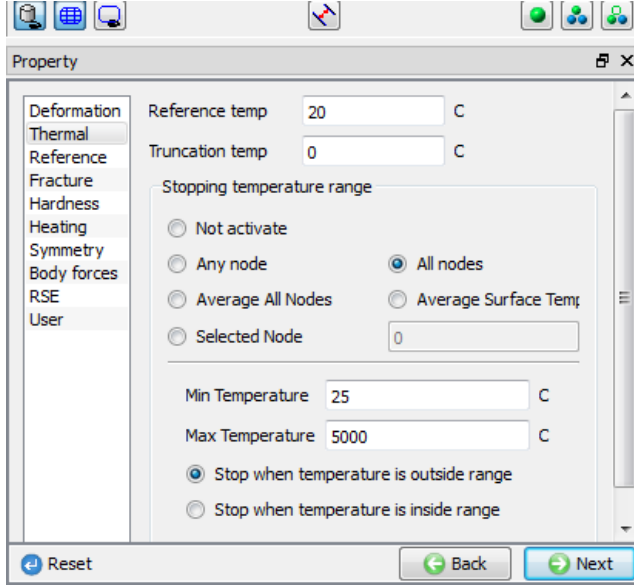


2) Kesici kaldırma: Kesici takımın numune ile teması kesilmelidir

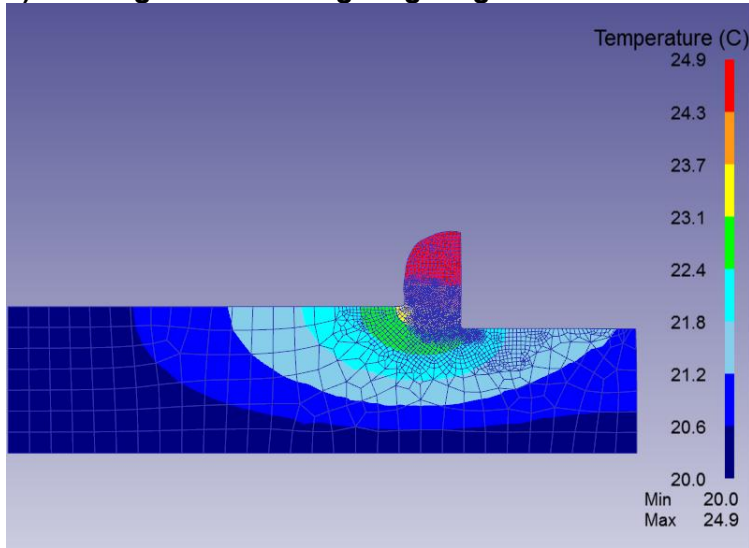


3) Yeni sınır değerleri ile numuneyi oda sıcaklığına getirme:



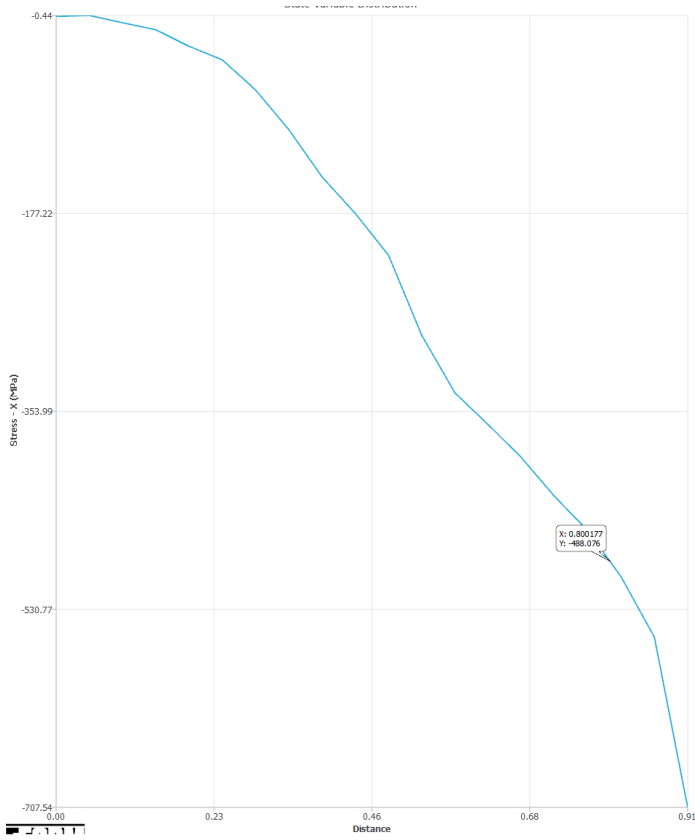
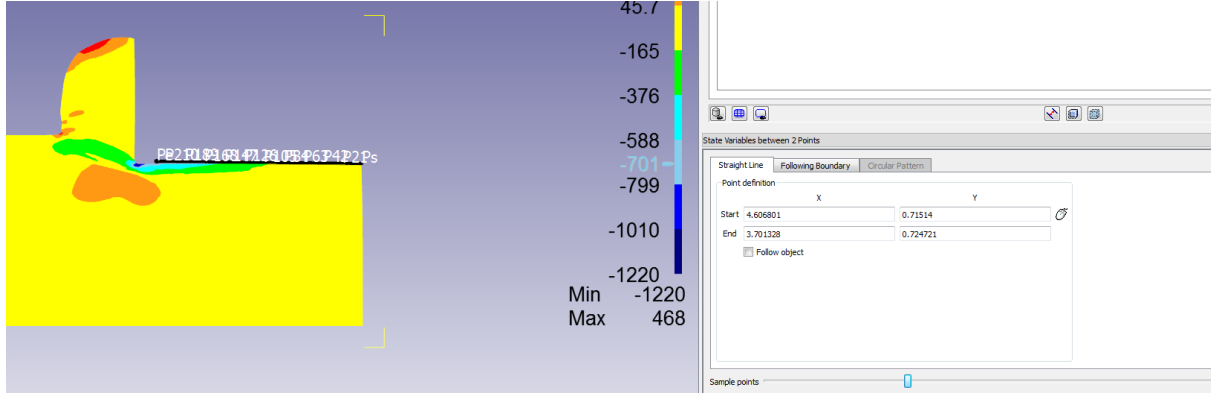


4) Sıcaklığın oda sıcaklığına geldiğinden emin olma:

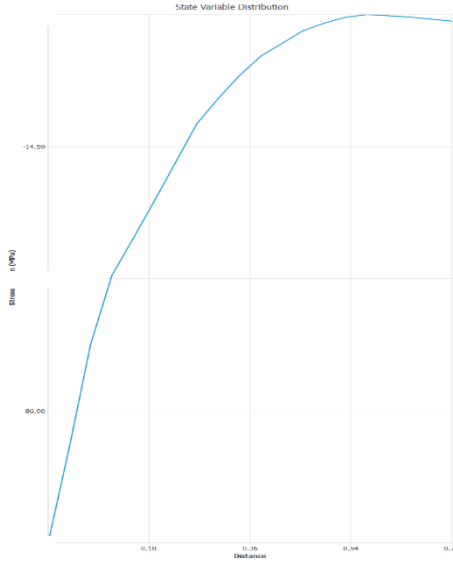
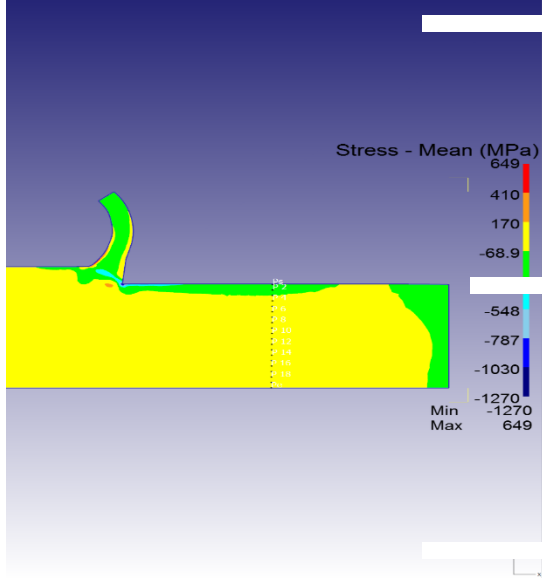


5) Kalıntı gerilim gözlemi: Bu aşamada numune yüzeyinde kalan ya da numune içerisinde kalan kalıntı gerilimler (x yönündeki, y yönündeki ya da equivalent değerler) gözlemlenebilir. Malzemenin akma yüzeyinin kıyası effective gerilime göre yapıldığı için effective kalıntı gerilim gözlemi en doğru gözlem olacaktır. Detaylı şekiller aşağıdadır.

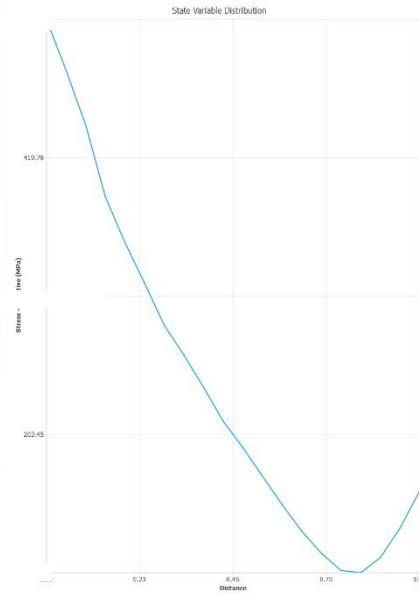
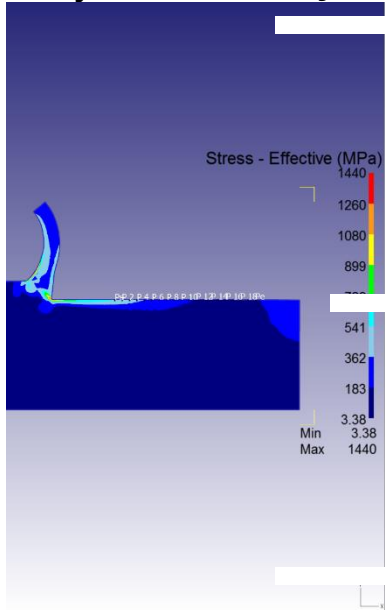
Yüzey kalıntı gerilimleri ve noktaların grafiği:

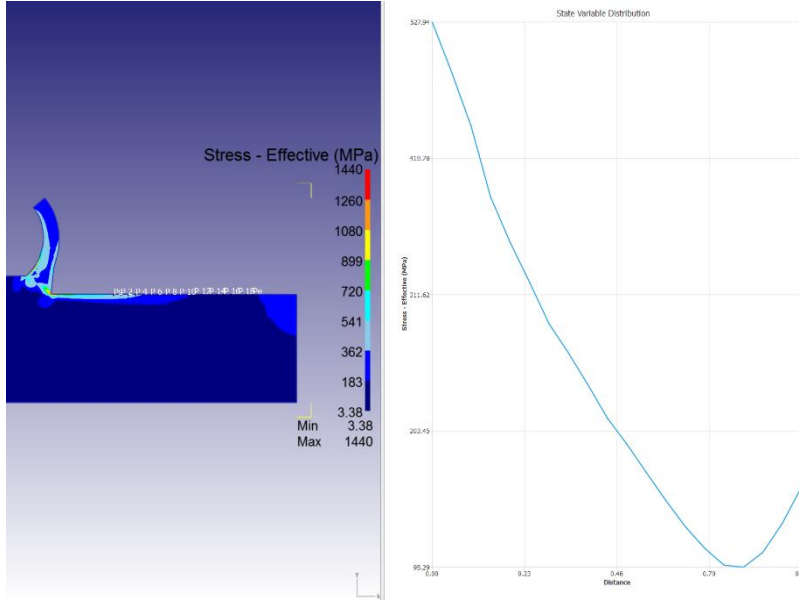


Numune içi kalıntı gerilimler ve grafik:



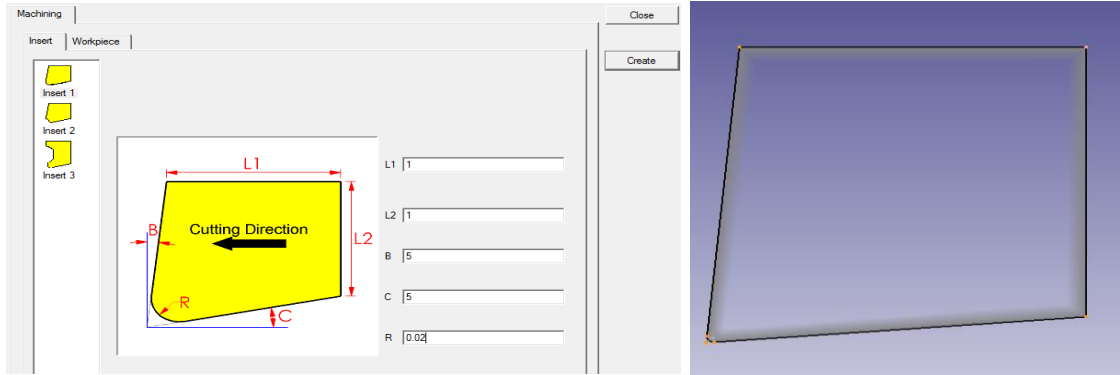
Yüzeyde ve malzeme içerisinde oluşan effective kalıntı gerilim örnek grafikleri:





3.2.2.2 Takım Aşınması Simülasyonları

Yapılan simülasyonlar sonucunda, her bir malzemenin kesiminden sonra kesici takım üzerinde oluşan aşınma hızlarını defom 2D simülasyon programı aracılığıyla bakılmıştır. Inconel 718'in kesilmesinde kullanılan takım geometrisi aşağıdaki resimlerdeki gibidir.



Üstte bulunan soldaki takım geometrisi için girilen değerleri göstermektedir. Üst tarafta sağdaki fotoğraf ise takım geometrisi girdileri girildikten sonra bulunan ve sonucunda oluşan ve katı (rigid) olarak tanımlanan Carbide takımı göstermektedir. Bu işlemler sonucunda aşınma hızı gözlemleri yapılmıştır. Aşınma hızı tahminlerinde takım aşınma modeli olan Usui aşınma modeli kullanılmıştır.



4.BULGULAR

Talaşlı imalat deney sonuçları 3 gereç ve yöntem bölümünde anlatıldığı gibi 2 ana başlık altında verilebilir.

4.1 Deneysel Bulgular

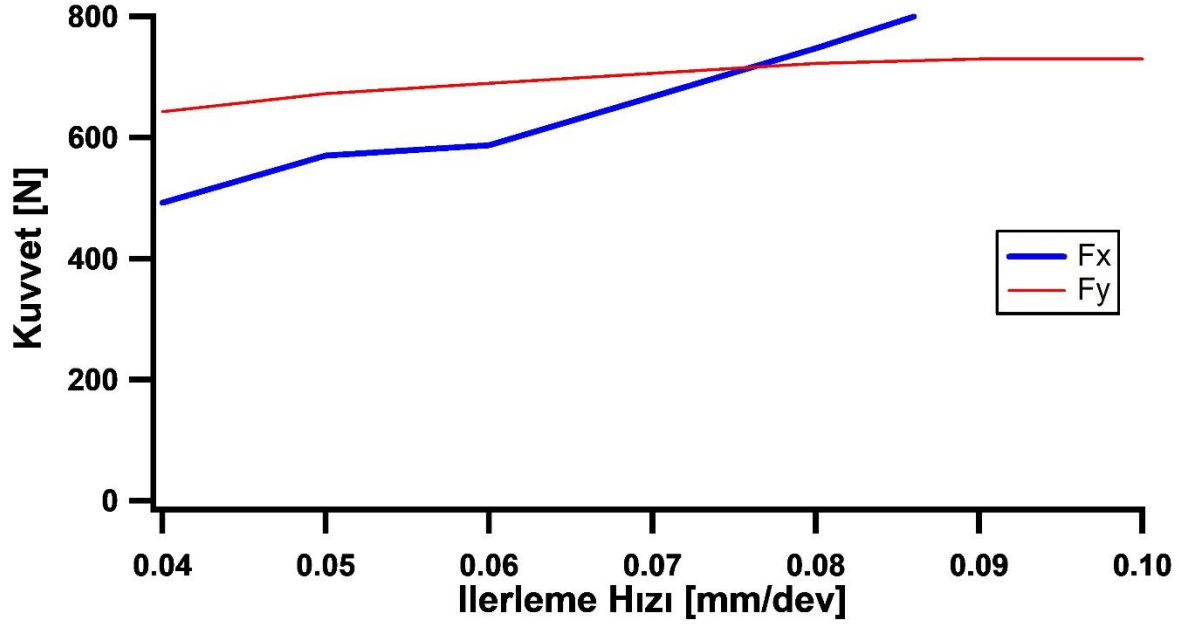
4.1.1 Kesme Kuvveti Bulguları

Yapılan dikey kesim işlemlerinde her kesme parametresi için teğetsel ve radyal kuvvetler elde edilmiştir. Bu kuvvetlere dik olan Z kuvvetleri beklenildiği üzere 0' a yakın değerlerde gözlenmiştir. Ayrıca kuvvetlerin doğru tespiti için her kesme parametresinde malzeme üzerinde 2 defa 1.5 mm derinliğinde talaş kaldırılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması ile oluşan kuvvetler elde edilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki tablolarda sunulmuştur. Ayrıca oluşan kuvvetlerin ilerleme hızına bağlı değişimleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Tablo 3. 60 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.

Test Num	Kesme hızı mm/min	İlerleme hızı h [mm/rev]	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Mil hızı (rpm)	Parça Kalınlığı	İşleme Süresi (sn)	Fx- Ft	Fy- Ft	Fz
1	60	0.040	50	48.5	388	3.05	2.90	470	625	40
2	60	0.040	48.5	47	400	3.05	2.81	515	660	20
3	60	0.050	50	48.5	388	2.94	2.32	560	670	40
4	60	0.050	48.5	47	400	2.94	2.25	580	675	45
5	60	0.060	50	48.5	388	2.78	1.93	585	680	55
6	60	0.060	48.5	47	400	2.78	1.88	590	700	90
7	60	0.080	50	48.5	388	2.87	1.45	740	725	60
8	60	0.080	48.5	47	400	2.87	1.41	755	720	80
9	60	0.090	50	48.5	388	2.92	1.29	820	725	40
10	60	0.090	48.5	47	400	2.92	1.25	850	735	40

11	60	0.100	50	48.5	388	2.90	1.16	860	730	40
12	60	0.100	48.5	47	400	2.90	1.13	900	730	60

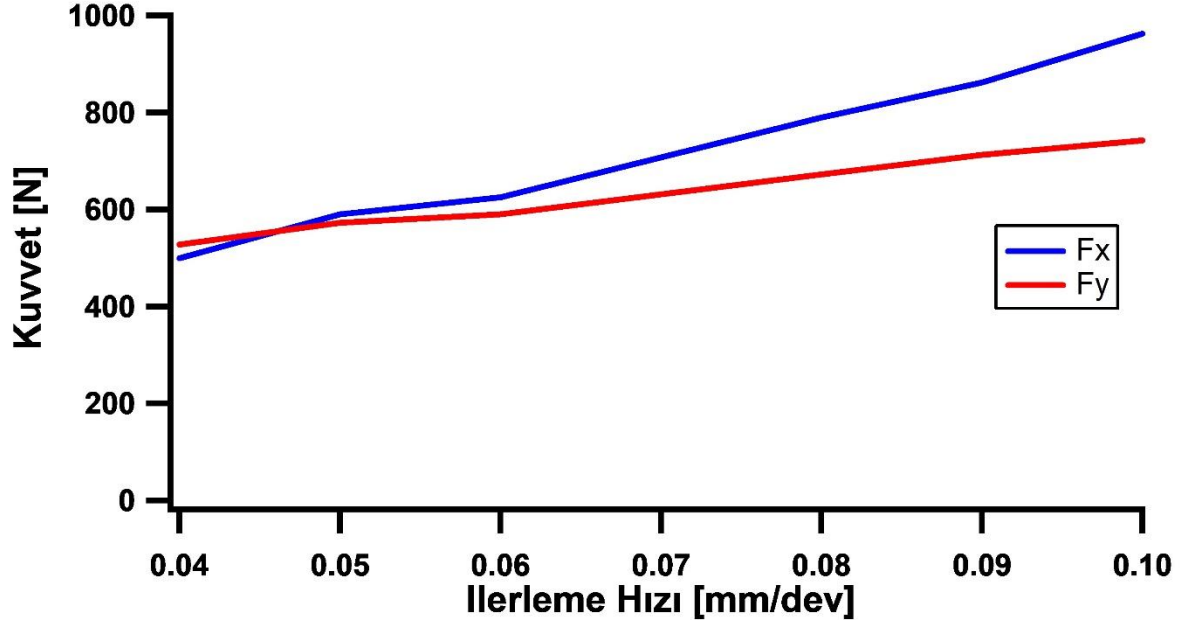


Şekil 4. 60 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.

Tablo 4. 30 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.

Test Num	Kesme hızı m/dk	İlerleme hızı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Mil hızı (rpm)	Parça Kalınlığı	İşleme Süresi (sn)	Fx-Ft	Fy-Ft	Fz
		h [mm/dev]								
1	30	0.040	50	48.5	194	3.21	5.80	480	525	30
2	30	0.040	48.5	47	200	3.21	5.63	520	530	30
3	30	0.050	50	48.5	194	3.08	4.64	580	570	40
4	30	0.050	48.5	47	200	3.08	4.50	600	575	60
5	30	0.060	50	48.5	194	2.82	3.87	610	580	40
6	30	0.060	48.5	47	200	2.82	3.75	640	600	40
7	30	0.080	50	48.5	194	2.88	2.90	780	670	40

8	30	0.080	48.5	47	200	2.88	2.81	810	675	50
9	30	0.090	50	48.5	194	2.97	2.58	850	700	50
10	30	0.090	48.5	47	200	2.97	2.50	875	725	50
11	30	0.100	50	48.5	194	2.85	2.32	925	735	50
12	30	0.100	48.5	47	200	2.85	2.25	1000	750	50

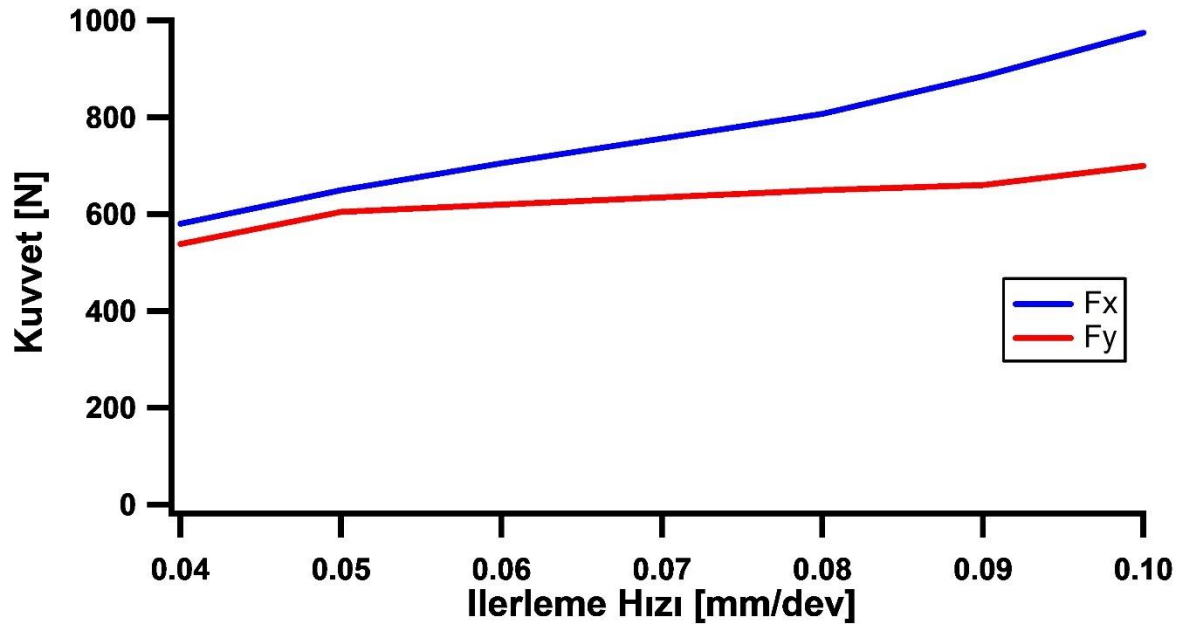


Şekil 5. 30 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.

Tablo 5. 15 m/dk kesme hızı ile dönen numunenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan kuvvetler.

Test Num	Kesme hızı m/dk	İlerleme hızı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Mil hızı (rpm)	Parça Kalınlığı	İşleme Süresi (sn)	Fx-Ft	Fy-Ft	Fz
		h [mm/dev]								
1	15	0.040	50	48.5	97	3.27	11.60	550	525	50
2	15	0.040	48.5	47	100	3.27	11.25	590	550	40
3	15	0.040	47	45.5	103	3.27	10.90	600	540	35

4	15	0.050	50	48.5	97	2.91	9.28	600	560	0
5	15	0.050	48.5	47	100	2.91	9.00	700	650	0
6	15	0.060	50	48.5	97	3.06	7.74	670	600	0
7	15	0.060	48.5	47	100	3.06	7.50	740	640	20
8	15	0.080	50	48.5	97	2.86	5.80	775	650	20
9	15	0.080	48.5	47	100	2.86	5.63	840	650	25
10	15	0.090	50	48.5	97	2.87	5.16	870	660	40
11	15	0.090	48.5	47	100	2.87	5.00	900	660	40
12	15	0.100	50	48.5	97	2.94	4.64	950	700	40
13	15	0.100	48.5	47	100	2.94	4.50	1000	700	40



Şekil 6. 15 m/dk kesme hızı ile dönen malzemenin farklı ilerleme hızları ile kesilmesi sonucu oluşan teğetsel ve radyal kuvvetlerin ortalama değerleri.

4.1.2 Kalıntı Gerilim Bulguları

XRD yöntemi ile hesaplanan kalıntı gerilimler farklı talaşlı imalat parametreleri için aşağıdaki tablolarda listelenmiştir.

Tablo 6. 60 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.

İlerleme [mm/dev]	Hızı	Deneysel Gerilim [MPa]	Artık XX
0.04		369.9	
0.05		884.3	
0.06		867.4	
0.08		721.6	
0.09		870	
0.1		783.2	

Tablo 7. 30 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.

İlerleme [mm/dev]	Hızı	Deneysel Gerilim [MPa]	Artık XX
0.04		595.5	
0.05		424.1	
0.06		542	
0.08		689.7	
0.09		791.5	
0.1		147.1	

Tablo 8. 15 m/dk kesme hızı ile kesilen malzemenin yüzeyinde oluşan artık gerilim.

İlerleme [mm/dev]	Hızı	Deneysel Gerilim [MPa]	Artık XX
0.04		431.7	
0.05		243.1	
0.06		309.6	
0.08		168.5	
0.09		542.8	
0.1		-92.3	

Kalıntı gerilim değerlerinin daha kapsamlı analizleri için XRD cihazı aracılığıyla incelenen numunelerin teğetsel yöndeki (XX) gerilme değerlerinin yanında asal gerilme değerleri ve Von Mises gerilme değerleri de bulunmuştur. Von Mises gerilme değerleri akma yorumlamasının yapılabilmesi için en önemli gözlemdir. Aşağıdaki tablolarda deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Tablo 9. 60 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.

İlerleme Hızı [mm/devir]	Asal Gerilme (σ_1) [MPa]	Asal Gerilme (σ_2) [MPa]	Asal Gerilme (σ_3) [MPa]
0.04	959.8	453.2	100.6
0.05	1698.1	1148.4	310.7
0.06	2766.8	1612.6	805.2
0.08	1998.3	1263.9	608.8
0.09	1917.2	1299.6	478.4
0.1	1143.5	861.9	240.4

Tablo 10. 30 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.

İlerleme Hızı [mm/devir]	Asal Gerilme (σ_1) [MPa]	Asal Gerilme (σ_2) [MPa]	Asal Gerilme (σ_3) [MPa]
0.04	980.6	648.3	61.2
0.05	1568.2	763.7	393.4
0.06	2515.4	1259.0	750.9
0.08	1900.8	1212.4	551.0
0.09	2104.5	1357.8	605.5
0.1	902.7	408.8	276.0

Tablo 11. 15 m/dk ile kesilen numunenin asal gerilme değerleri.

İlerleme Hızı [mm/devir]	Asal Gerilme (σ_1) [MPa]	Asal Gerilme (σ_2) [MPa]	Asal Gerilme (σ_3) [MPa]
0.04	-1261.8	-403.7	179.7
0.05	1202.4	447.9	224.0
0.06	874.4	467.7	216.0

0.08	2246.8	834.1	701.3
0.09	2186.7	1166.3	656.4
0.1	1039.8	230.7	112.4

Asal gerilim değerlerinden numunelerin Von Mises gerilim değerleri aşağıda verilen formül aracılığıyla hesaplanmıştır.

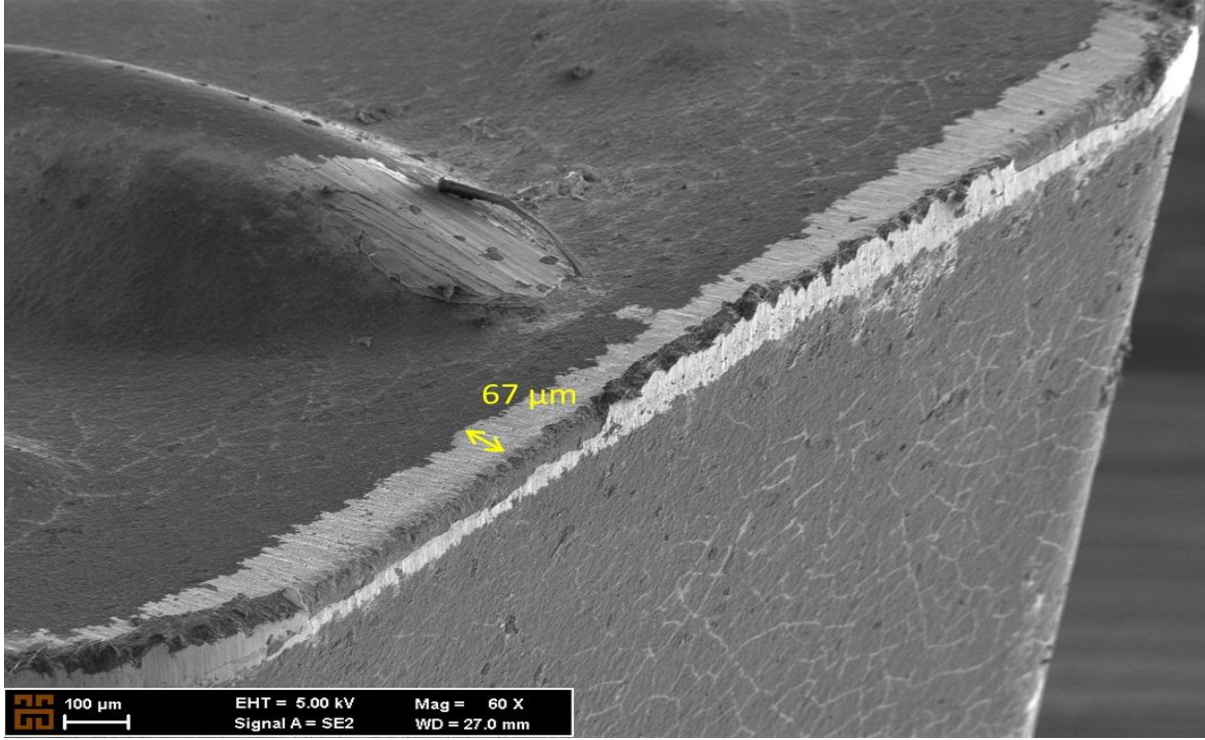
$$\text{Von Mises Gerilmesi} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Tablo 12. Farklı ilerleme hızları ile kesilen numunenin Von Mises gerilme değerleri.

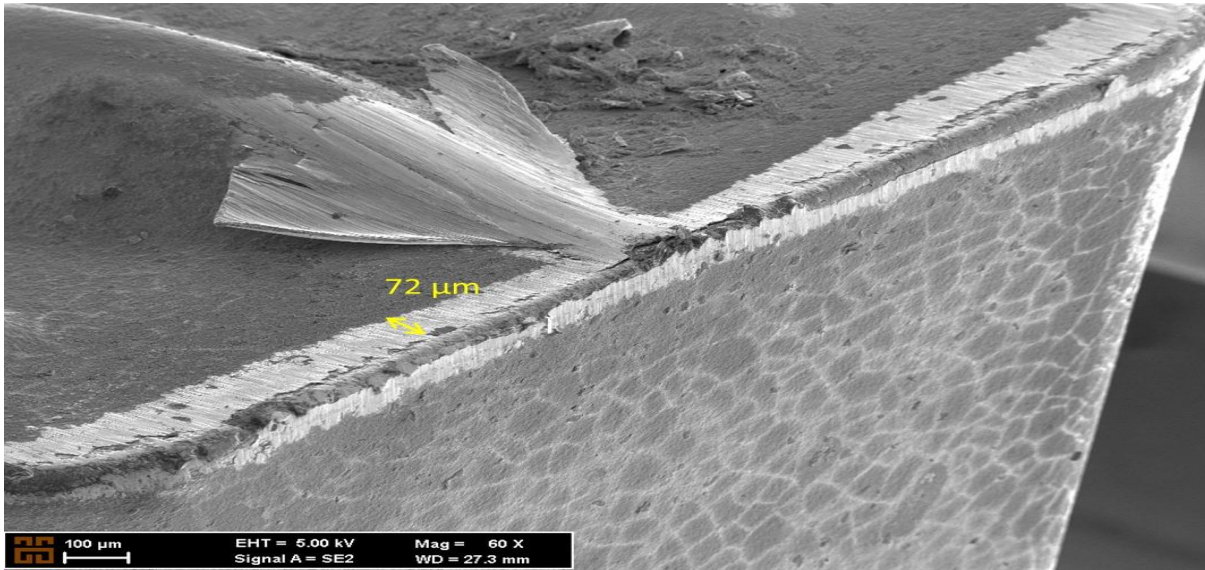
İlerleme hızı (mm/dev)	Von Mises [MPa] V15	Von Mises [MPa] V30	Von Mises [MPa] V60
0.04	1256	806.35	748.06
0.05	887.91	1040.3	1210.1
0.06	575.43	1573.2	1707.6
0.08	1483.6	1169	1204
0.09	1349.6	1298.2	1250.2
0.1	874.27	571.98	800.36

4.1.3 Kesici Takım Aşınma Bulguları

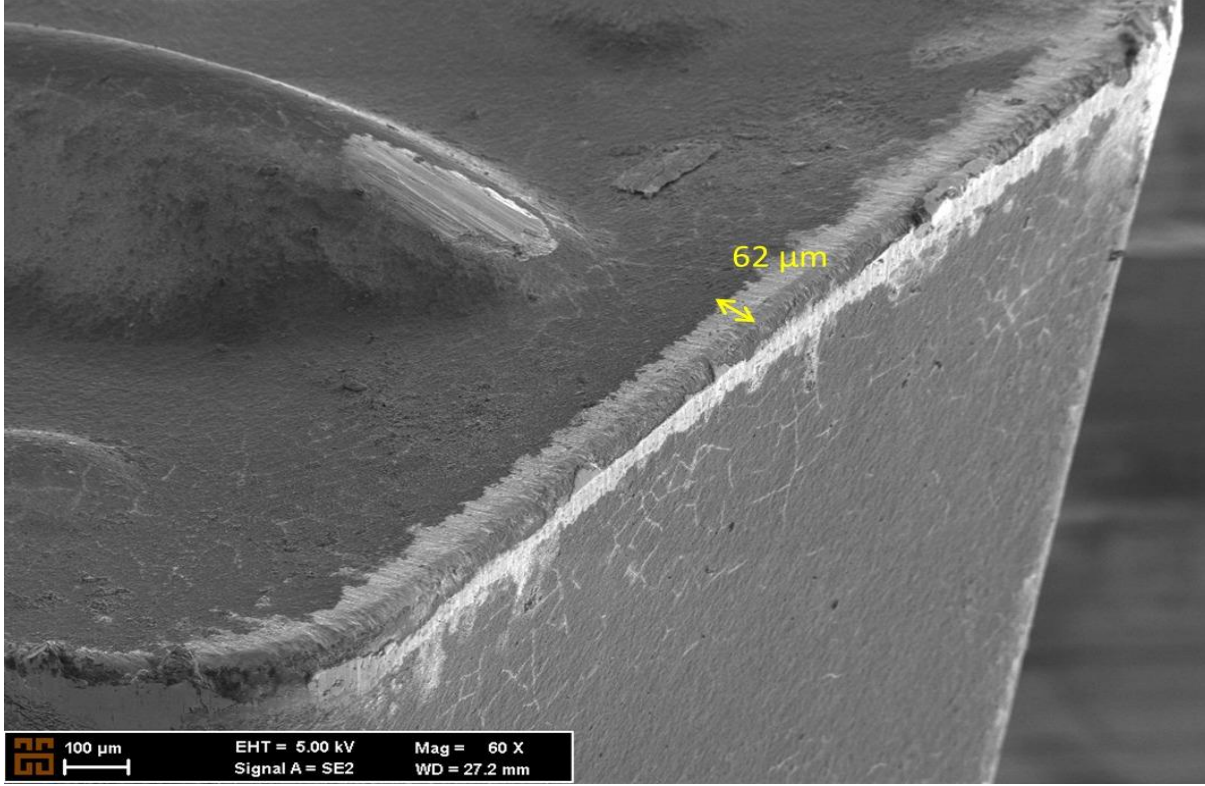
Kesici takımında oluşan aşınma sonuçları Şekil 7-9'da verilmiştir.



Şekil 7. 60 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü



Şekil 8. 30 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü



Şekil 9. 30 m/dk kesme hızı 0.04 ilerleme hızında oluşan takım görüntüsü

4.1.4 Sertlik Ölçüm Bulguları

Gerçekleştirilen talaşlı imalat sonrasında, her malzeme üzerindeki sertlik değişimleri mikro sertlik değerleri incelenmiştir. Elimizde bulunan 3 farklı ilerleme hızda kesimi yapılan malzemelerin her biri 6 farklı ilerleme hızı ile kesildiğinden dolayı, her malzeme yüzeyinde oluşan 6 adet sertlik değerleri ölçülmüştür. Kesme işlemi uygulanan malzemelerin her birinin Vickers sertlik ölçüm cihazıyla malzeme üzerinde oluşan mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 farklı ilerleme hızı için ortalama sertlik sonuçları Tablo 12-14 arasında verilmiştir.

Tablo 13. 60 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri

İlerleme Hızı (mm/dev)	Deneysel Mikro Sertlik [HV]
0.04	467.2
0.05	492.3
0.06	502.6

0.08	520.4
0.09	506.4
0.1	499.6

Tablo 14. 30 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri

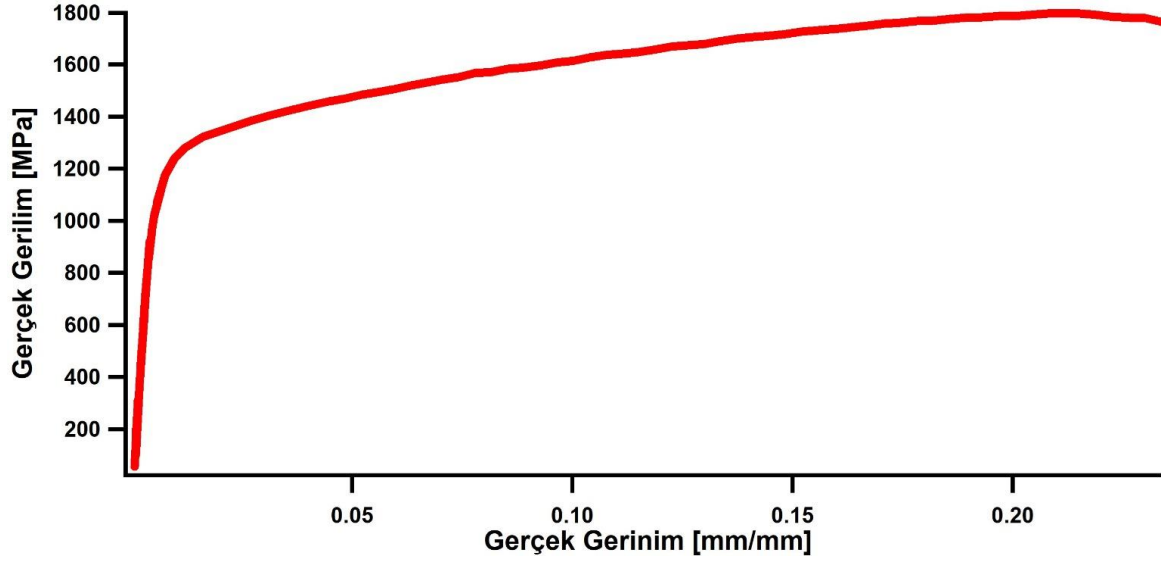
İlerleme Hızı (mm/dev)	DeneySEL Mikro Sertlik [HV]	Johnson Cook Mikro sertlik [HV]	VPSC Mikro Sertlik [HV]
0.04	460.4	491.4	460.4
0.05	450.3	482.3	463.1
0.06	394.9	432	414.5
0.08	402.1	423.7	383.5
0.09	488.8	479.6	459.2
0.1	562.3	545.8	507.3

Tablo 15. 15 m/dk kesme hızı mikro sertlik değerleri

İlerleme Hızı (mm/dev)	DeneySEL Mikro Sertlik [HV]	Johnson Cook Mikro sertlik [HV]	VPSC Mikro Sertlik [HV]
0.04	450.2	497.5	466.3
0.05	473.4	507	459.1
0.06	453.9	501.4	479.5
0.08	508.4	520.2	489.1
0.09	483.7	472.1	453.7
0.1	560.1	636.9	601.4

4.1.5 Çekme Testi Bulguları

Inconel 718 alaşımının oda sıcaklığında ve $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında mekanik davranışın Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 10. Inconel 718 süper alaşımının mekanik davranışı.

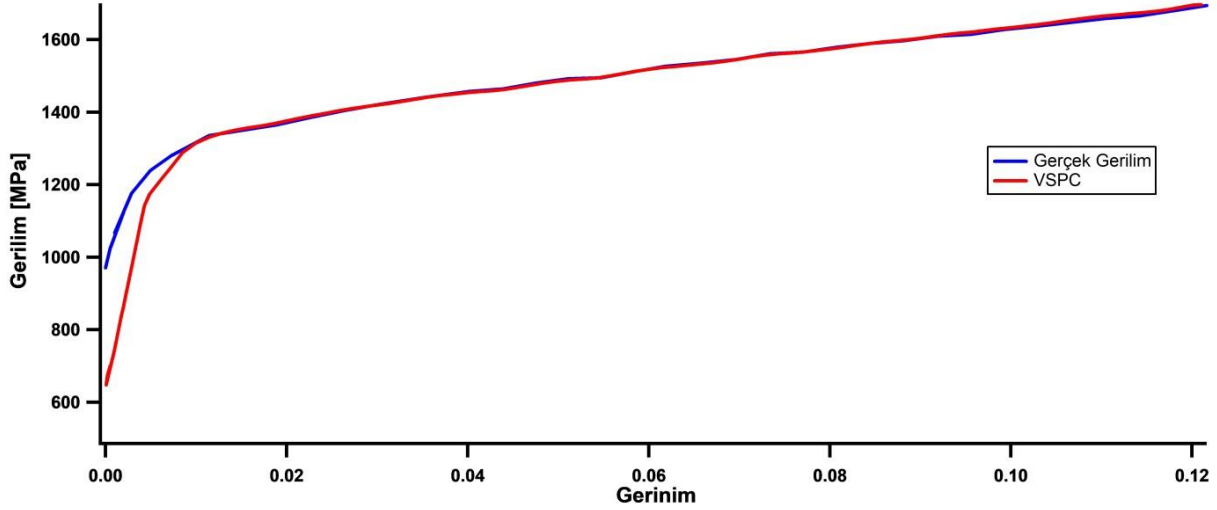
4.2 Modelleme Bulguları

4.2.1 Kristal Plastisite Modellemesi

Şekil 7’de gösterilen mekanik davranış, mikroyapısal gözlemler ile belirlenen mikroyapısal girdiler ile mikro ölçekte VPSC programı ile modellenmiştir. Kristal plastisite modellemesi sonucu malzemenin Voce sertleşme parametreleri belirlenmiştir (Tablo 15). Voce sertleşme parametreleri çok taneli yapılarda τ_0 parametresi malzemenin akma geriliminin taylor faktörüne bölünmesiyle bulunmaktadır. Bunun için ilk olarak deneysel elde edilen akma geriliminin taylor faktörüne bölünerek τ_0 parametresi 315.18 olarak elde edilmiştir. Yapılan kristal plastisite modellemesinin, deneysel mekanik davranış ile karşılaştırılması gösterimi Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’den de görüleceği gibi kristal plastisite modeli ile deneysel çıktı son derece uyumludur. Modellenin düşük gerinimlerdeki başarısızlığı mikro akma değerinin τ_0 olarak kullanılmasından kaynaklıdır ve bütün kristal plastisite modellerinde bu fark bulunmaktadır.

Tablo 16. In 718 Voce sertleşme parametreleri

τ_0	τ_1	θ_0	θ_1
315.18	780	960	4.25



Şekil 11. Inconel 718 süper alaşımının kristal plastisite modellemesi

Tablo 15'deki parametrelerin belirlenmesi sırasında, her ekseninde oluşan göreceli deformasyonu belirten hız gradyanları, homojen bir deformasyon olduğu için aşağıdaki şekilde ayarlanmıştır.

$$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \end{matrix}$$

Ayrıca, kristal plastisite simülasyonları sırasında yüzey merkezli kübik kristal yapısında aktif olan 12 adet birincil kayma düzlemleri aktif hale getirilip, ikizlenme mekanizması deformasyona katkı sağlamadığı için aktif edilmemiştir.

Tablo 15'de verilen Voce pekleşme parametreleri bulunduktan sonra, aynı pekleşme parametreleri sabit kalarak, her ilerleme hızı için farklı hız gradyanları ile kristal plastisite tabanlı çok ölçekle malzeme davranışı her ilerleme hızı için açığa çıkarılmıştır. 4.2.2 kısmında anlatılan sonlu elemanlar analizleri, bu hız gradyanları ve Tablo 15'de verilen Voce pekleşme parametreleri kullanılarak açığa çıkarılan mikroyapı tabanlı çok eksenli malzeme modeli ile gerçekleştirilmiştir. 3 farklı hızda kesilen malzemelerin her biri 6 farklı ilerleme hızı ile kesildiğinden dolayı toplamda 18 farklı hız gradyanı deform simülasyonları aracılığıyla bulunmuştur.

Bulunan hız gradyan değerleri aşağıda gösterilmektedir.

Aşağıda verilen matrisler 60m/dak kesilme hızı ile kesilen 6 farklı ilerleme hızı için bulunan hız gradyanlarıdır.

$$0.04: \begin{bmatrix} 1.02 & 1 & 0 \\ 1 & -0.51 & 0 \\ 0 & 0 & -0.51 \end{bmatrix}$$

$$0.05: \begin{bmatrix} 0.89 & 1 & 0 \\ 1 & -0.445 & 0 \\ 0 & 0 & -0.445 \end{bmatrix}$$

$$0.06: \begin{bmatrix} 0.43 & 1 & 0 \\ 1 & -0.215 & 0 \\ 0 & 0 & -0.215 \end{bmatrix}$$

$$0.08: \begin{bmatrix} 1.13 & 1 & 0 \\ 1 & -0.565 & 0 \\ 0 & 0 & -0.565 \end{bmatrix}$$

$$0.09: \begin{bmatrix} 1.23 & 1 & 0 \\ 1 & -0.615 & 0 \\ 0 & 0 & -0.615 \end{bmatrix}$$

$$0.1: \begin{bmatrix} 0.91 & 1 & 0 \\ 1 & -0.455 & 0 \\ 0 & 0 & -0.455 \end{bmatrix}$$

Aşağıda verilen matrisler 30m/dak kesilme hızı ile kesilen 6 farklı ilerleme hızı için bulunan hız gradyanlarıdır.

$$0.04: \begin{bmatrix} 0.75 & 1 & 0 \\ 1 & -0.375 & 0 \\ 0 & 0 & -0.375 \end{bmatrix}$$

$$0.05: \begin{bmatrix} 0.27 & 1 & 0 \\ 1 & -0.135 & 0 \\ 0 & 0 & -0.135 \end{bmatrix}$$

$$0.06: \begin{bmatrix} 1.05 & 1 & 0 \\ 1 & -0.525 & 0 \\ 0 & 0 & -0.525 \end{bmatrix}$$

$$0.08: \begin{bmatrix} 1.3 & 1 & 0 \\ 1 & -0.65 & 0 \\ 0 & 0 & 0.65 \end{bmatrix}$$

$$0.09: \begin{bmatrix} 0.83 & 1 & 0 \\ 1 & -0.415 & 0 \\ 0 & 0 & -0.415 \end{bmatrix}$$

$$0.1: \begin{bmatrix} 0.66 & 1 & 0 \\ 1 & -0.33 & 0 \\ 0 & 0 & -0.33 \end{bmatrix}$$

Aşağıda verilen matrisler 15m/dak kesilme hızı ile kesilen 6 farklı ilerleme hızı için bulunan hız gradyanlarıdır.

$$0.04: \begin{bmatrix} 0.84 & 1 & 0 \\ 1 & -0.42 & 0 \\ 0 & 0 & -0.42 \end{bmatrix}$$

$$0.05: \begin{bmatrix} 1.01 & 1 & 0 \\ 1 & -0.505 & 0 \\ 0 & 0 & -0.505 \end{bmatrix}$$

$$0.06: \begin{bmatrix} 0.83 & 1 & 0 \\ 1 & -0.415 & 0 \\ 0 & 0 & -0.415 \end{bmatrix}$$

$$0.08: \begin{bmatrix} 1.11 & 1 & 0 \\ 1 & -0.555 & 0 \\ 0 & 0 & -0.555 \end{bmatrix}$$



$$0.09: \begin{bmatrix} 1.30 & 1 & 0 \\ 1 & -0.65 & 0 \\ 0 & 0 & -0.65 \end{bmatrix}$$

$$0.1: \begin{bmatrix} 1.24 & 1 & 0 \\ 1 & -0.62 & 0 \\ 0 & 0 & -0.62 \end{bmatrix}$$

Yukarıda gösterilen 18 farklı hız gradyanı ayrı ayrı VPSC programına sırasıyla eklenmiştir. Her hız gradyanı için simülasyonları yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonrası da kristal plastisite tabanlı çok ölçekli malzeme modeli açığa çıkarılıp bu model Deform 2D sonlu elemanlar analiz programına malzeme modeli girdisi olarak eklenmiştir.

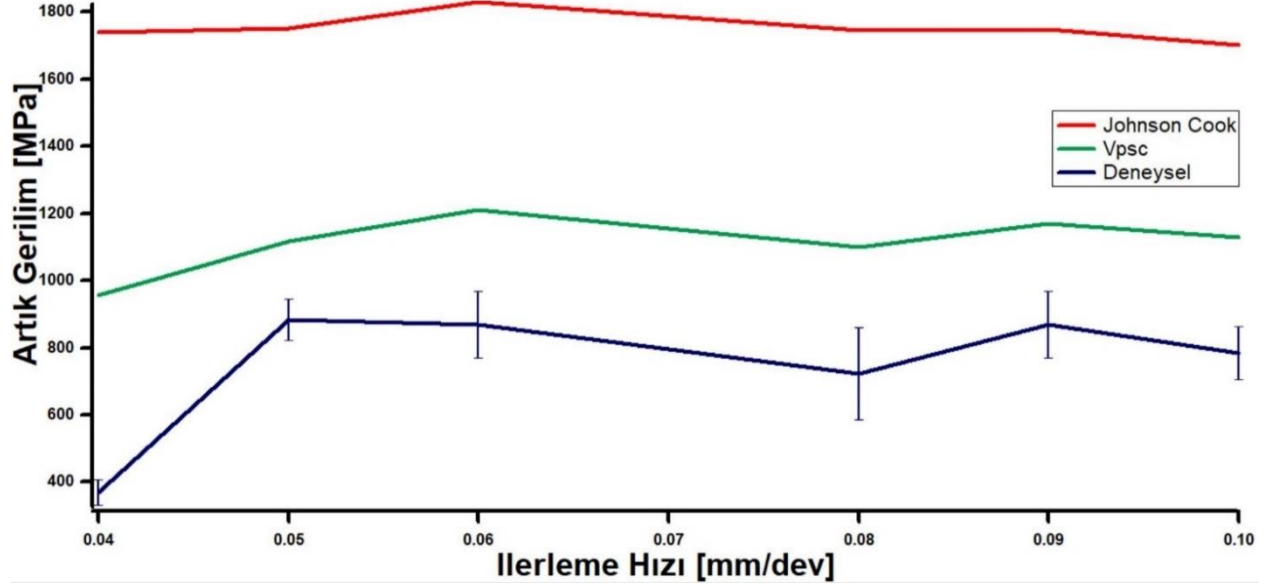
4.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi

4.2.2.1 Kalıntı Gerilim Bulguları

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan 2 farklı malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde 2 malzeme modeli için ayrı ayrı aşağıdaki kalıntı gerilim çıktıları gözlemlenmiştir. Sonuçlar hem nümerik, hem şekilsel olarak gösterilmiştir.

Tablo 17. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)

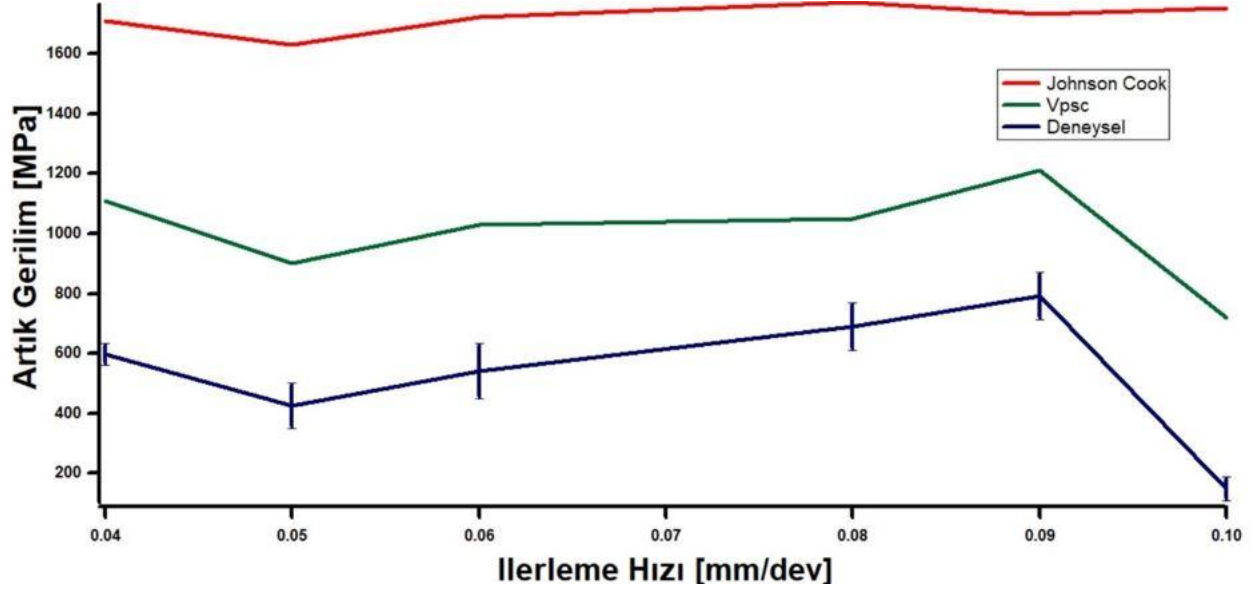
İlerleme Hızı [mm/dev]	DeneySEL Artık Gerilim XX [MPa]	DeneySEL Tolerans [MPa]	Johnson Cook Gerilim XX [MPa]	VPSC Gerilim [MPa]
0.04	369.9	± 38.7	1738.56	955.29
0.05	884.3	±62.5	1751.57	1117.4
0.06	867.4	±98.1	1829.85	1210.632
0.08	721.6	±136.3	1745.022	1100.18
0.09	870	±99	1746.99	1170.2
0.1	783.2	±78.4	1700.644	1128.43



Şekil 12. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı).

Tablo 18. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı)

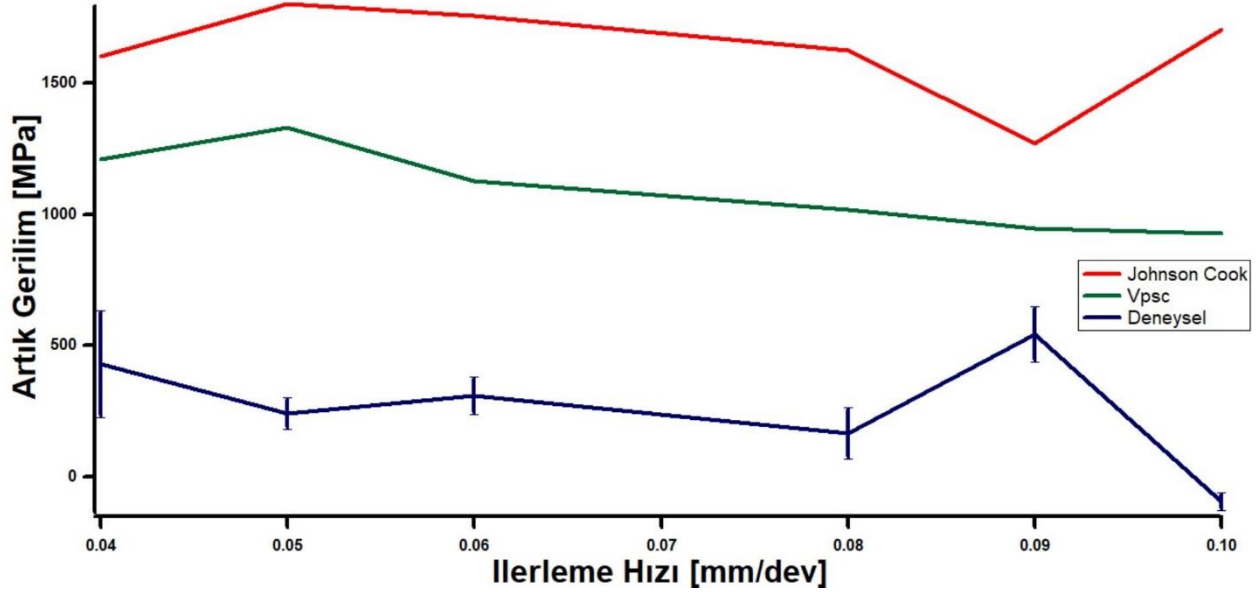
İlerleme Hızı [mm/dev]	Deneysel Artık Gerilim XX [MPa]	Deneysel Tolerans [MPa]	Johnson Cook Gerilim XX [MPa]	VPSC Gerilim [MPa]
0.04	595.5	±36.9	1710	1110.43
0.05	424.1	±76.4	1630	902.38
0.06	542	±91.5	1722.5	1030.9
0.08	689.7	±79	1772.9	1052
0.09	791.5	±80.8	1734.9	1209
0.1	147.1	±39.1	1753.8	718.56



Şekil 13. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı).

Tablo 19. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)

İlerleme Hızı [mm/dev]	Deneysel Artık Gerilim XX [MPa]	Deneysel Tolerans [MPa]	Johnson Cook Gerilim XX [MPa]	VPSC Gerilim [MPa]
0.04	431.7	±204	1600	1210
0.05	243.1	±61.4	1800	1327
0.06	309.6	±69.8	1753	1125
0.08	168.5	±98.3	1622	1019
0.09	542.8	±103.5	1268	945
0.1	-92.3	±34.2	1701	926

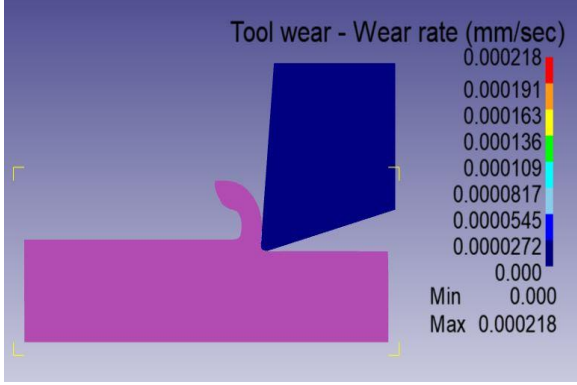


Şekil 14. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin kalıntı gerilim sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı).

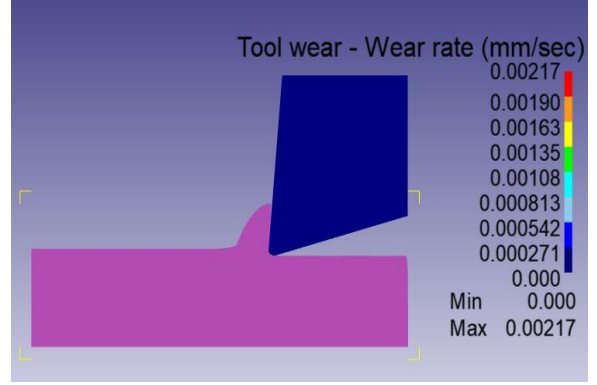
Johnson-Cook malzeme modellemesiyle yapılan simülasyon sonuçları kırmızı renkteki grafikleri oluşturmuştur. Yeşil renkle oluşturulan grafikler ise çok eksenli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli ile oluşturulan simülasyon sonuçlarıdır. Mavi renkle oluşturulan grafikler ise XRD ile ölçülen malzeme üzerinde kesim işleminden sonra kalan XX eksenindeki artık gerilimleri göstermektedir. Yukarıda oluşturulan grafiklerden görüldüğü üzere, çok eksenli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli, Johnson Cook modeline göre deneysel veriye daha çok yaklaşmış ve daha başarılı bir sonuç vermiştir.

4.2.2.2 Kesici Takım Aşınma Bulguları

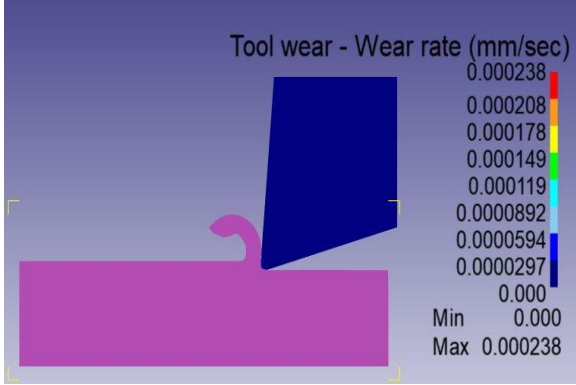
Yukarıdaki bölümlerde anlatılan 2 farklı malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde 2 malzeme modeli için ayrı ayrı aşağıdaki kesici takım aşınma sonuçları gözlemlenmiştir. Gözlemlenen sonuçlar aşınma oranı ve aşınma hızıdır. Öncelikle Johnson-Cook malzeme modeli ile gerçekleştirilen kesici takım aşınma sonuçları aşağıda verilmiştir.



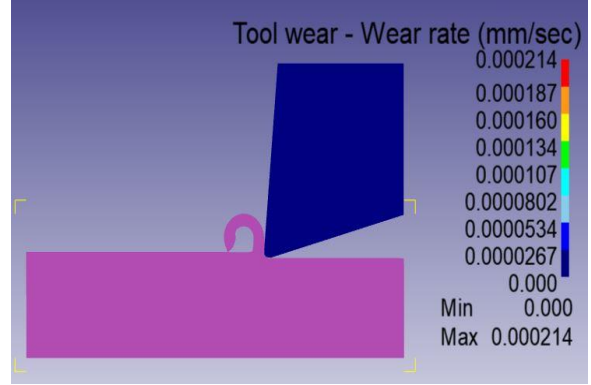
15m\dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



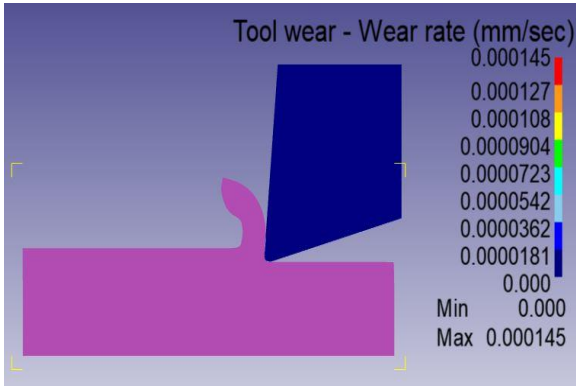
15m\dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



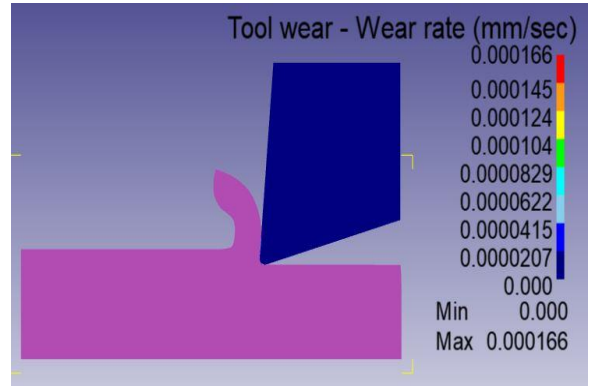
15m\dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı



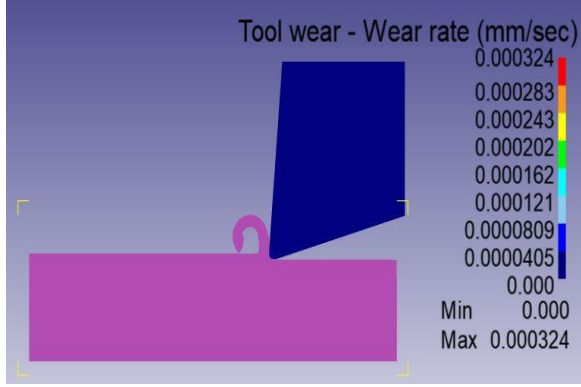
15m\dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı



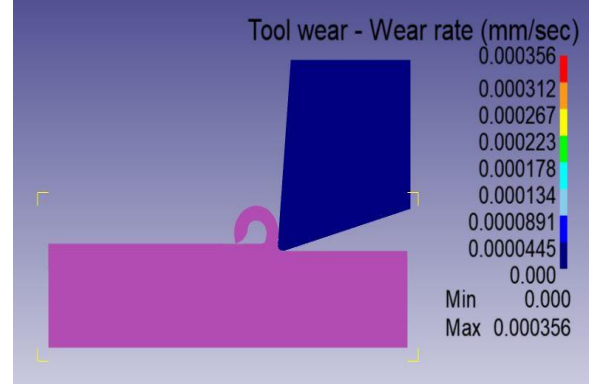
15m\dak kesme hızı 0.09mm/dev ilerleme hızı



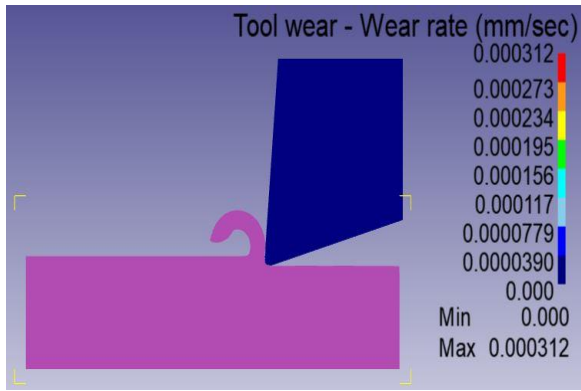
15m\dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı



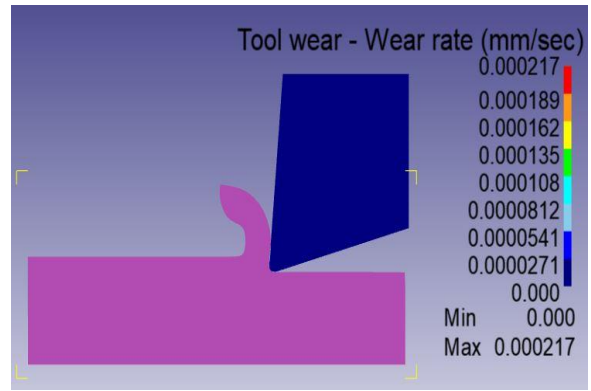
30 m\dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



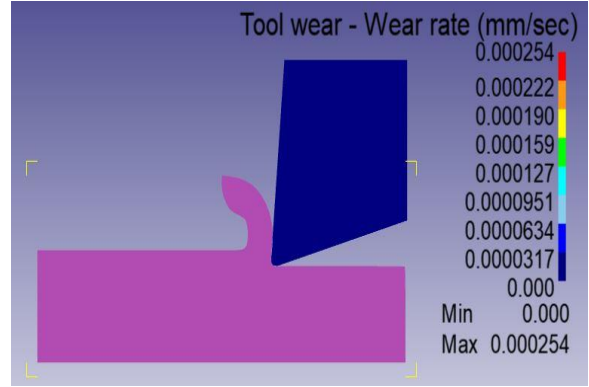
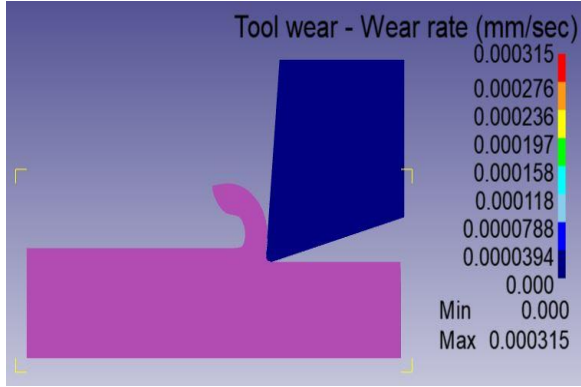
30 m\dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



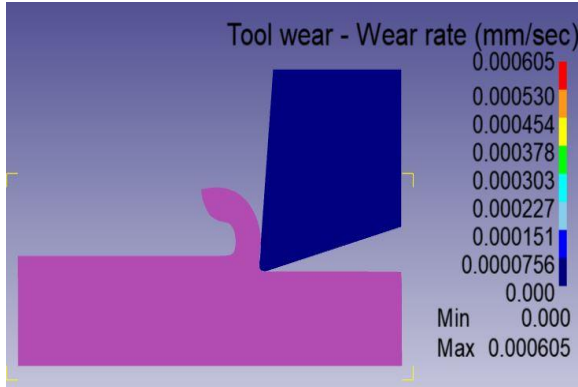
30 m\dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı



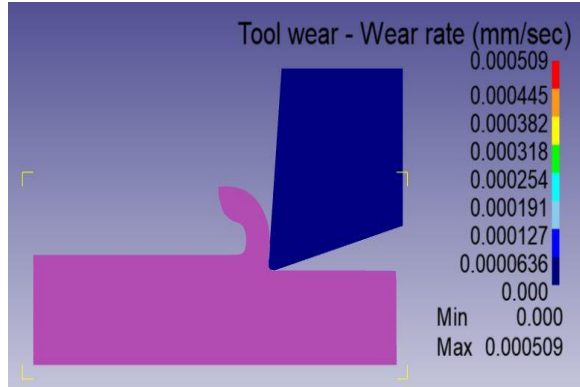
30 m\dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı



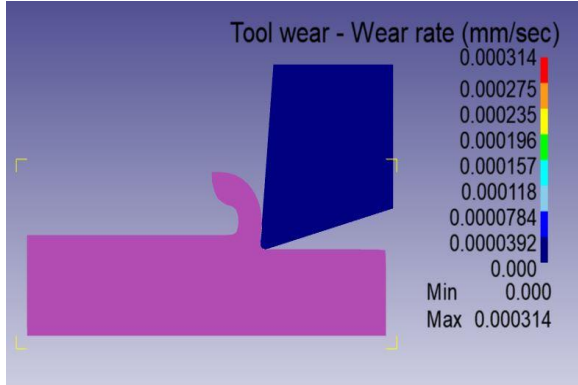
30 m\ dak kesme hızı 0.09 mm/dev ilerleme hızı



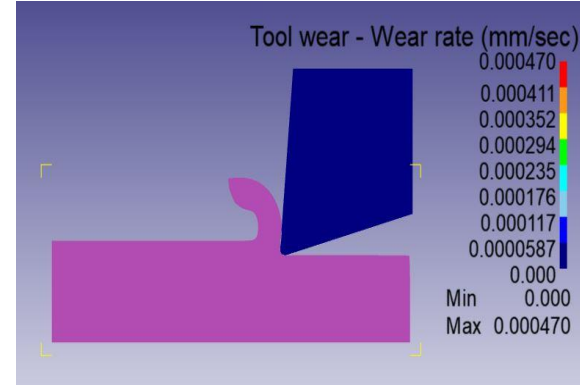
30 m\ dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı



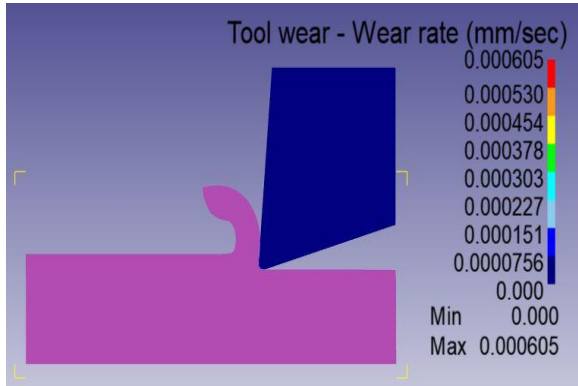
60 m\ dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



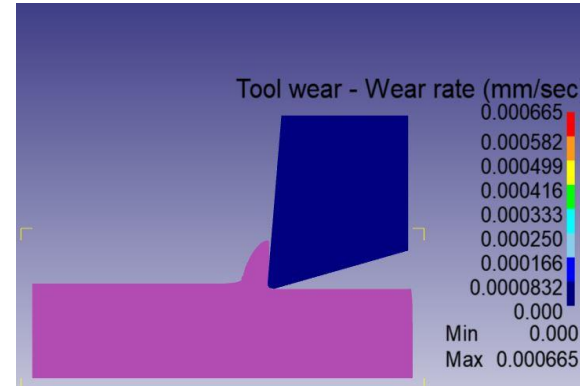
60 m\ dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



60 m\ dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı



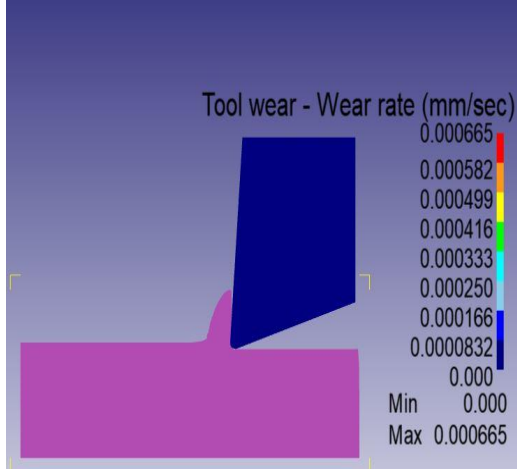
60 m\ dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı



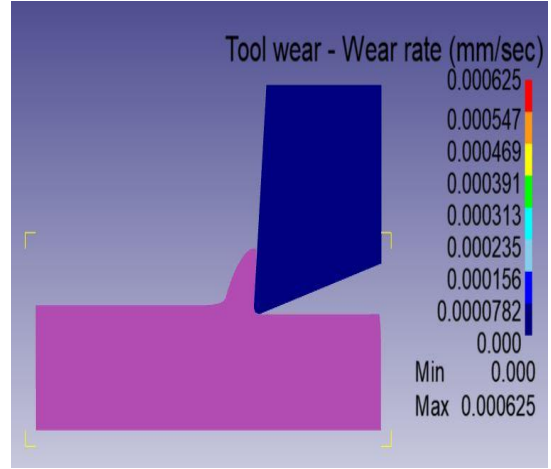
60 m\ dak kesme hızı 0.09 mm/dev ilerleme hızı

60 m\ dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı

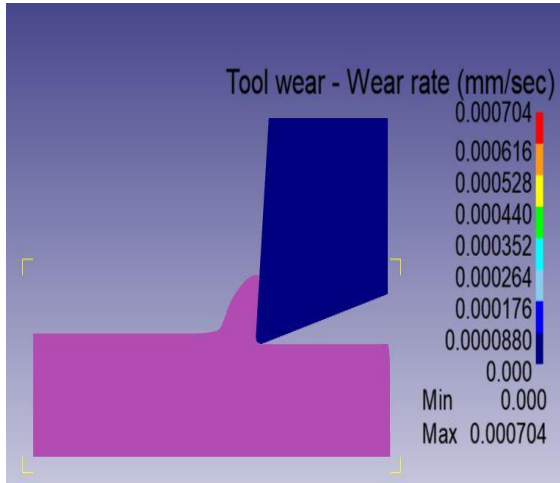
Bu şekillerden sonra çok eksenli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli ile gerçekleştirilen gerçekleştirilen kesici takım aşınma sonuçları aşağıda verilmiştir.



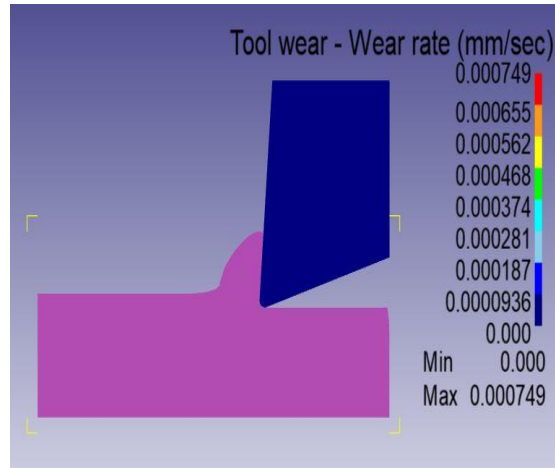
15m\dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



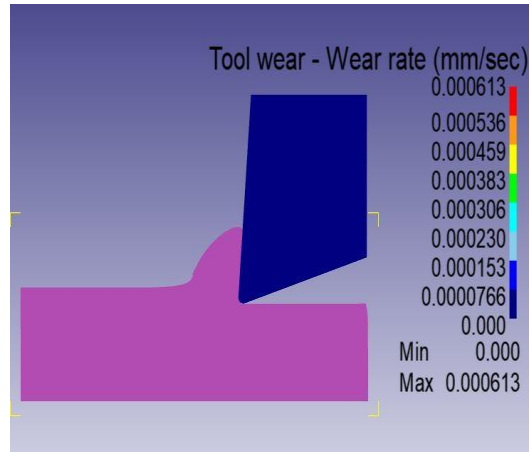
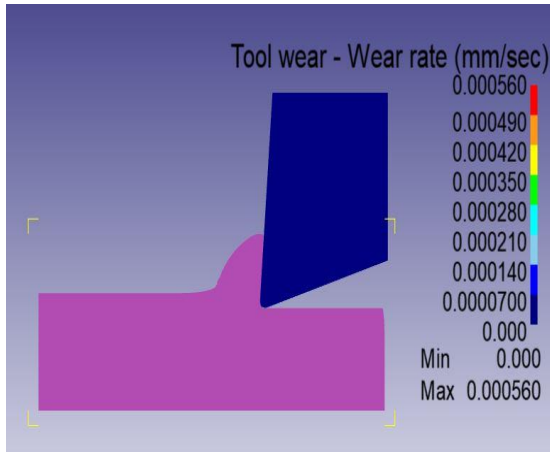
15m\dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



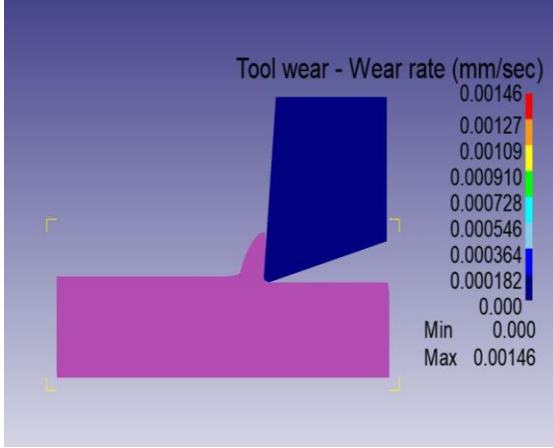
15m\dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı



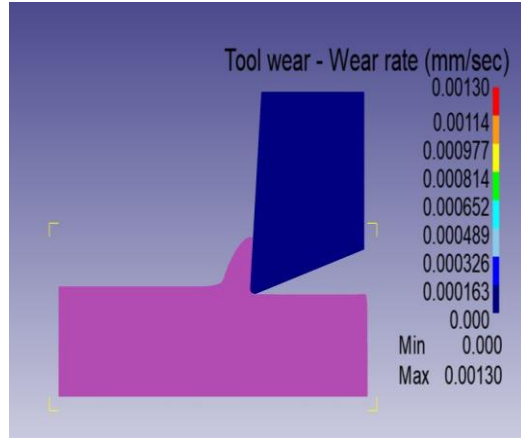
15m\dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı



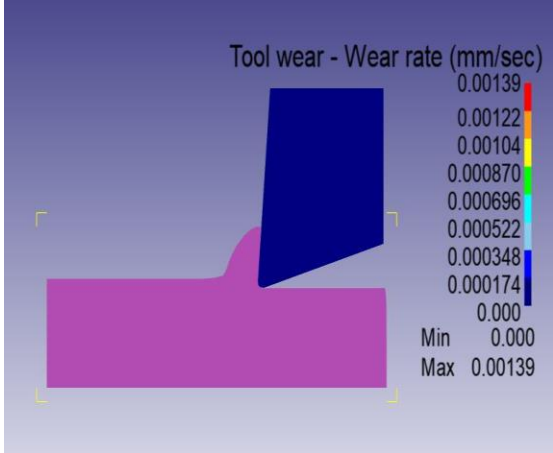
15 m\dak kesme hızı 0.09 mm/dev ilerleme hızı



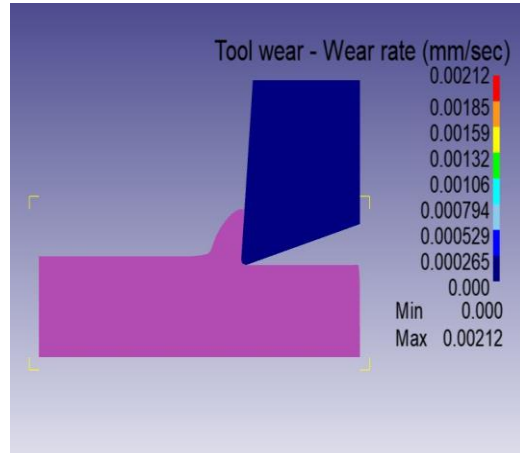
15 m\dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı



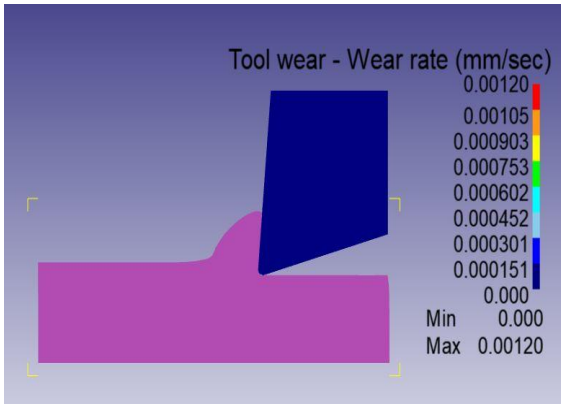
30 m\dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



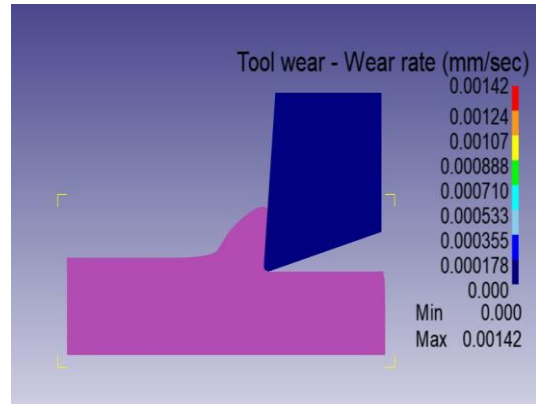
30 m\dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



30 m\dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı

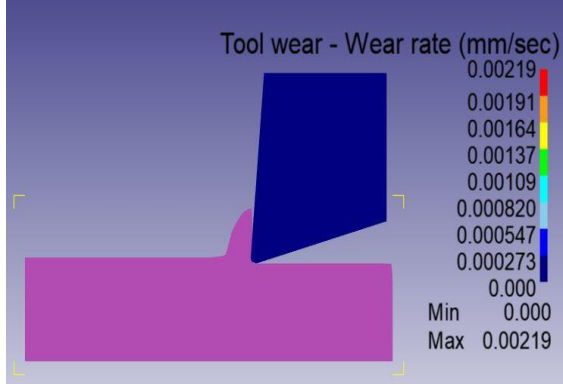


30 m\dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı

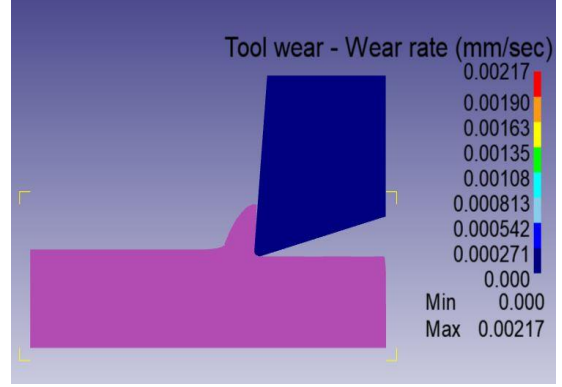


30 m\dak kesme hızı 0.09 mm/dev ilerleme hızı

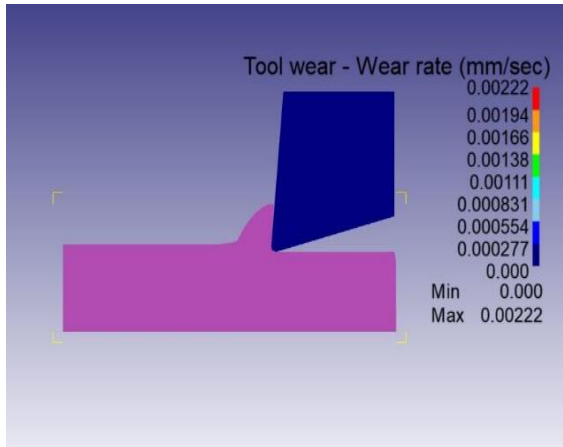
30 m\dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı



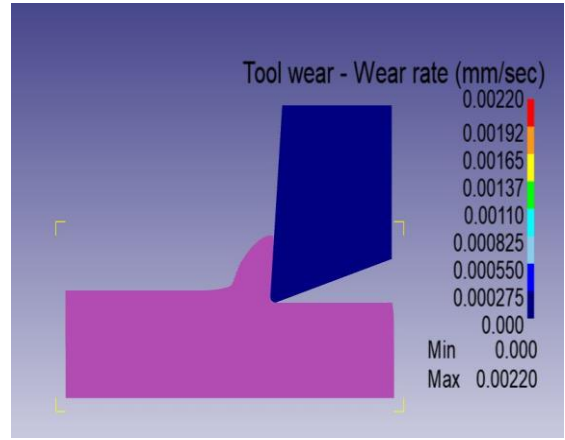
60 m\dak kesme hızı 0.04 mm/dev ilerleme hızı



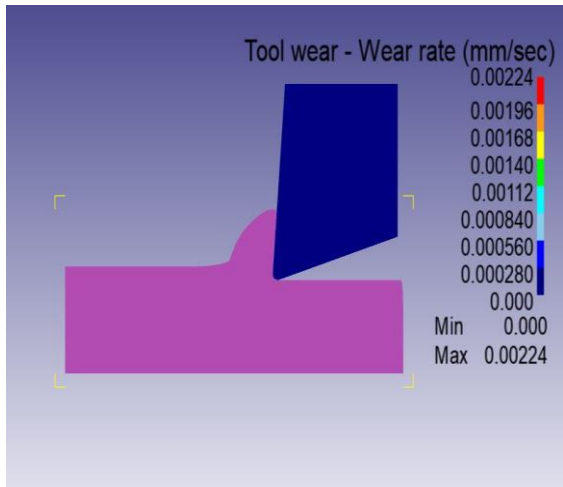
60 m\dak kesme hızı 0.05 mm/dev ilerleme hızı



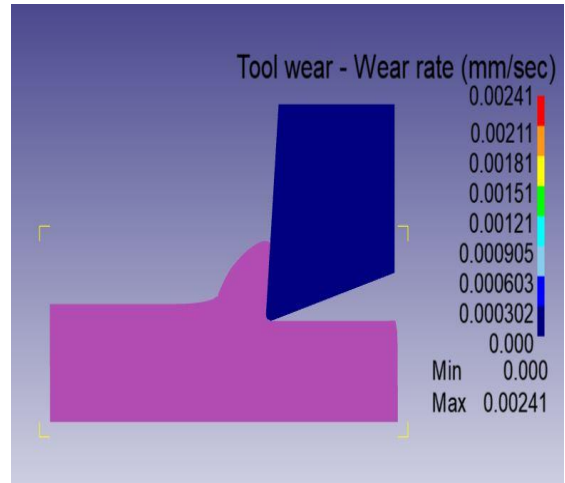
60 m\dak kesme hızı 0.06 mm/dev ilerleme hızı



60 m\dak kesme hızı 0.08 mm/dev ilerleme hızı



60 m\dak kesme hızı 0.09 mm/dev ilerleme hızı



60 m\dak kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme hızı

Yukarıda oluşturulan modelleme sonuçları, taramalı elektron mikroskobu aşınma sonuçları ile karşılaştırıldığında, çok eksenli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli, Johnson Cook modeline göre deneysel veriye daha çok yaklaşmış ve daha başarılı bir sonuç vermiştir.

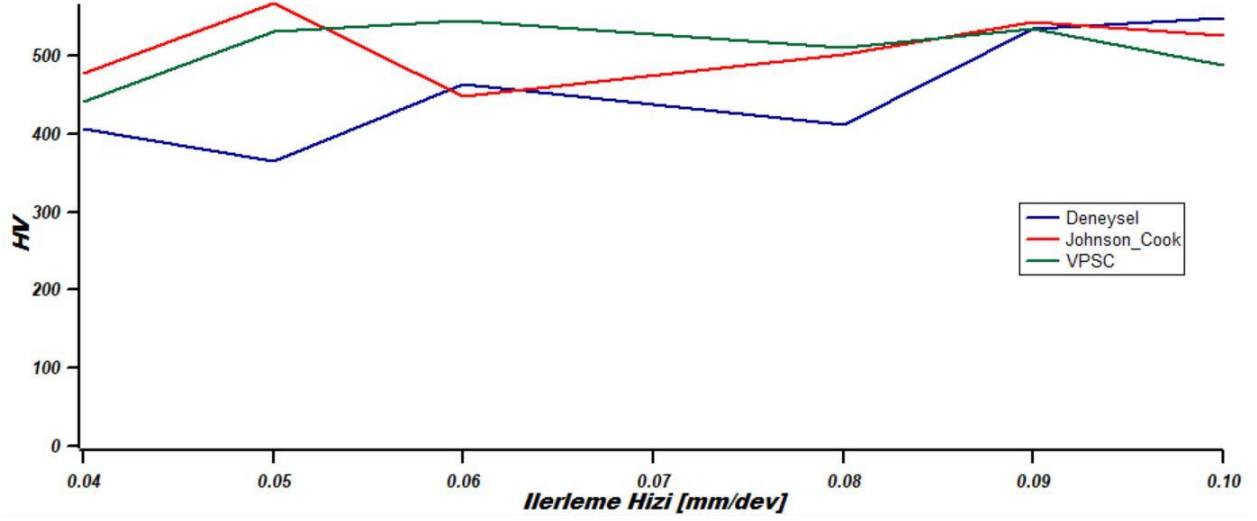
4.2.2.3 Sertlik Bulguları

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan 2 farklı malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde 2 malzeme modeli için ayrı ayrı aşağıdaki sertlik çıktıları gözlemlenmiştir. Sonuçlar hem nümerik, hem şekilsel olarak gösterilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre her malzemenin gerinim-gerinim tablolarında ki en yüksek dayancı değerinin 3.353 ile bölünmesi sonucunda, malzemelerin simülasyon sonuçlarına göre mikro sertlik değerleri belirlenmiştir.

$$UTS=3.353 \times VHN$$

Tablo 20. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikro-sertlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)

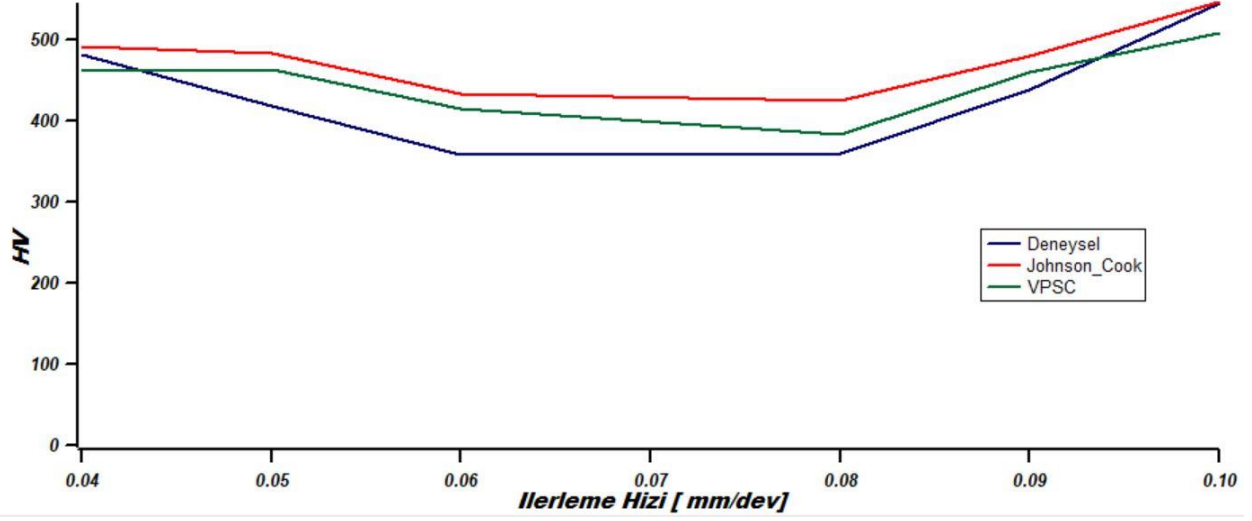
İlerleme Hızı (mm/dev)	Deneysel Mikro Sertlik [HV]	Johnson Cook Mikro sertlik [HV]	VPSC Mikro Sertlik [HV]
0.04	406.7	477.1	441.3
0.05	364.5	567.4	530.8
0.06	463.1	447.7	544.2
0.08	412.1	501.05	509.9
0.09	534.4	543.3	533.8
0.1	548.7	526.7	487



Şekil 15. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroserlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (60 m/dk kesme hızı)

Tablo 21. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroserlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı).

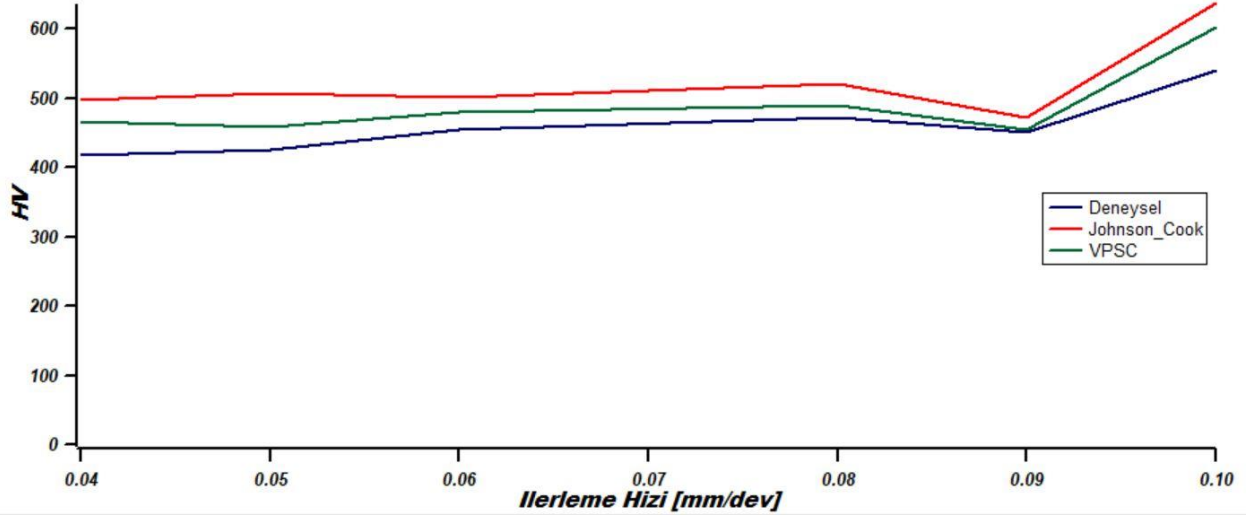
İlerleme Hızı (mm/dev)	Deneysel Mikro Sertlik [HV]	Johnson Cook Mikro sertlik [HV]	VPSC Mikro Sertlik [HV]
0.04	481.2	491.4	460.4
0.05	417.7	482.3	463.1
0.06	357.7	432	414.5
0.08	360	423.7	383.5
0.09	438	479.6	459.2
0.1	544.5	545.8	507.3



Şekil 16. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroserlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (30 m/dk kesme hızı).

Tablo 22. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroserlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)

İlerleme Hızı (mm/dev)	DeneySEL Mikro Sertlik [HV]	Johnson Cook Mikro sertlik [HV]	VPSC Mikro Sertlik [HV]
0.04	417.7	497.5	466.3
0.05	426.2	507	459.1
0.06	453.9	501.4	479.5
0.08	472.3	520.2	489.1
0.09	450.3	472.1	453.7
0.1	540.3	636.9	601.4



Şekil 17. Johnson Cook malzeme modeli ile kristal plastisite tabanlı malzeme modelinin mikroserlik sonuçları üzerindeki karşılaştırması (15 m/dk kesme hızı)

Johnson-Cook malzeme modellemesiyle yapılan simülasyon sonuçları kırmızı renkteki grafikleri oluşturmuştur. Yeşil renkle oluşturulan ise VPSC simülasyon sonuçlarıdır. Mavi renkle oluşturulan grafikler ise deneysel yöntemler ile ölçülen malzeme üzerinde kesim işleminden sonra üzerinde oluşan mikro sertlik değerlerini göstermektedir. Yukarıda oluşturulan grafiklerden görüldüğü üzere, çok eksenli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli, Johnson Cook modeline göre deneysel veriye daha çok yaklaşmış ve daha başarılı bir sonuç vermiştir.



5. SONUÇ

Bu projede Inconel 718'in deneysel talaşlı imalat sonuçlarıyla, kristal plastisite tabanlı çok eksenli malzeme modeli ve Johnson-Cook malzeme modeli ile yapılan sonlu elemanlar simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. İlk olarak 3 farklı kesme hızıyla kesilen (15 m/dak, 30 m/dak, 60 m/dak) ve her biri 6 farklı ilerleme hızlarıyla (0.04 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.06 mm/dev, 0.08 mm/dev, 0.09 mm/dev, 0.1 mm/dev) kesildikten sonra malzeme yüzeyinde oluşan sertlik değerleri, malzeme üzerinde oluşan kalıntı gerilimleri ve kesici takımında oluşan aşınmalar gözlenmiştir. Daha sonra literatürden Johnson Cook malzeme modellemesi parametreleri Deform 2D programına uygulanarak 18 farklı simülasyonları gerçekleştirip, sertlik değişimleri, kalıntı gerilimleri ve kesici takım aşınmaları incelenmiştir. Son olarak kullanılan modellemede malzemelerin mikroyapısal girdilerini de içeren kristal plastisite modeli uygulanarak gerçekleştirilen simülasyon yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı simülasyonlarda görülmüştür ki, kristal plastisite tabanlı malzeme modeli, klasik Johnson-Cook malzeme modeline göre deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar vermiştir. Malzeme modellemelerinde ölçek ne kadar küçülürse ve farklı ölçekler aynı anda çalışırsa gerçek deneysel sonuca daha yakın sonuçları alınacağı gerçeği bir kez daha mikroyapı girdileri ile elde edilen kristal plastisite modeli ile çıkarılan çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışının Deform 2D simülasyon sonuçlarından açıkça gözlenmektedir.

Maliyet ve zaman tasarrufu açısından, yapılacak olan simülasyonların gerçeğe yakın sonuçlar vermesi önemli bir etkidir. Daha önceden yapılan simülasyonlarda kullanılan tek ölçekli Johnson-Cook malzeme modellemesi deneysel sonuçlara yeterince yakın ve gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Kristal plastisite tabanlı malzeme modeli kullanıldığı zaman talaşlı imalat simülasyonlarında deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar bulunduğundan dolayı, Johnson-Cook yerine kullanılacak yeni bir metodoloji ortaya konulmuştur. Kanıtlanan metodoloji farklı malzemelere de kullanılabilir ve bu sayede en uygun yüzey hızı, kesme derinliği gibi talaşlı imalat girdileri bulunarak; kalıntı gerilimler sonucunda oluşabilecek yüzey bozukluğu, mikro çatlaklar gibi istenmeyen faktörlerin önüne geçilip yüzey kalitesi sağlanabilir, kesici takımında oluşabilecek aşınmalar öngörülüp takım yaşam süresi uzatılabilir ve sertlik değerleri öngörülerek istenilen sertliğe ulaşabilecek şekilde talaşlı imalat gerçekleştirilebilir ve talaşlı imalatı gerçekleştirilen malzemenin uygulama alanlarında kaliteli bir şekilde kullanılması sağlanabilir. Bu projenin bir sonraki adımı olarak ise başarısı kanıtlanan metodoloji farklı yüzey hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi değerlerde farklı bir çok malzeme için tekrarlanacak ve sonuçta oluşacak tepki yüzeyine yapılacak optimizasyonla kritik adımlar belirlenecektir. Bunun sonucunda ise kritik malzemeler için uygun ve kritik girdiler üretim öncesi hesaplanabilir. Bu sayede, üretim



denemeleri ve hatalarının, istenmeyen takım kırılmalarının önüne geçilebilecek ve yüzey bütünlüğü ve kalitesi yüksek olan malzemeler talaşlı imalat ile açığa çıkarılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Amato, K. N., Gaytan, S. M., Murr, L. E., Martinez, E., & Shindo, P. W. (2012). Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materialia*, 60(5), 2229–2239. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.032>
- Balbaa, M. A., & Nasr, M. N. A. (2015). Prediction of residual stresses after laser-assisted machining of inconel 718 using SPH. *Procedia CIRP*, 31, 19–23. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.034>
- Díaz-Álvarez, J., Cantero, J. L., Miguélez, H., & Soldani, X. (2014). Numerical analysis of thermomechanical phenomena influencing tool wear in finishing turning of Inconel 718. *International Journal of Mechanical Sciences*, 82, 161–169. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.03.010>
- Fan, Y., Hao, Z., Lin, J., & Yu, Z. (2015). New observations on tool wear mechanism in machining Inconel 718 under water vapor + air cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 90, 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.049>
- Geng, P., Li, W., Zhang, X., Deng, Y., Kou, H., Ma, J., ... Wu, X. (2017). A theoretical model for yield strength anomaly of Ni-base superalloys at elevated temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 706, 340–343. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.262>
- Grzesik, W., Niesłony, P., & Laskowski, P. (2017). Determination of Material Constitutive Laws for Inconel 718 Superalloy Under Different Strain Rates and Working Temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(12), 5705–5714. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3017-8>
- Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., Saoubi, R. M., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Meyer, D., ... Jayal, A. D. (2011). CIRP Annals - Manufacturing Technology Surface integrity in material removal processes : Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>
- Kortabarria, A., Armentia, I., & Arrazola, P. (2016). Sensitivity analysis of material input data influence on machining induced residual stress prediction in Inconel 718. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 63, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.02.005>
- Lee, W.-S., & Kao, H.-C. (2014). High temperature deformation behaviour of Haynes 188 alloy subjected to high strain rate loading. *Materials Science and Engineering: A*, 594, 292–301.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.076>

- Madariaga, A., Kortabarria, A., Hormaetxe, E., Garay, A., & Arrazola, P. J. (2016). Influence of Tool Wear on Residual Stresses When Turning Inconel 718. *Procedia CIRP*, 45, 267–270. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.359>
- Onal, O., Bal, B., Canadinc, D., & Akdari, E. (2015). Experimental and Numerical Evaluation of Thickness Reduction in Steel Plate Heat Exchangers. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 137(4), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4031080>
- Onal, O., Bal, B., Toker, S. M., Mirzajanzadeh, M., Canadinc, D., & Maier, H. J. (2014). Microstructure-based modeling of the impact response of a biomedical niobium-zirconium alloy. *Journal of Materials Research*, 29(10). <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.105>
- Rahman, M., Seah, W. K. H., & Teo, T. T. (1997). The machinability of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1–3), 199–204. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02624-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02624-6)
- Rotella, G., Dillon, O. W., Umbrello, D., Settineri, L., & Jawahir, I. S. (2013). Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.005>
- Smith, M., Levesque, J.-B., Bichler, L., Sediako, D., Gholipour, J., & Wanjara, P. (2017). Residual stress analysis in linear friction welded in-service Inconel 718 superalloy via neutron diffraction and contour method approaches. *Materials Science and Engineering: A*, 691(March), 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.038>
- Yan, S., Zhu, D., Zhuang, K., Zhang, X., & Ding, H. (2014). Modeling and analysis of coated tool temperature variation in dry milling of Inconel 718 turbine blade considering flank wear effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2985–3001. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.006>
- Zhao, Q., Liu, Z., Li, S., Huang, T., Xia, P., & Lu, L. (2017). Evolution of the Brass texture in an Al-Cu-Mg alloy during hot rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 786–799. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.322>
- Withers, P. J., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Residual stress part 1 - Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355–365. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>
- XU, X. yan, MA, X. dong, WANG, H., YE, Z., CHANG, J. wei, XU, Y., ... GAO, Y. kui. (2019). Characterization of residual stresses and microstructural features in an Inconel 718 forged compressor disc. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*,



29(3), 569–578. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64965-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64965-4)

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. BURAK BAL
Proje No:	118M253
Proje Başlığı:	Çok Ölçekli Malzeme Modellemesi Yoluyla Talaşlı İmalat Çıktılarının Daha Kapsamlı Ve Doğru Analizi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	SEYD EHSAN LAYEGH KHAVIDAKI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ABDULLAH GÜL Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/08/2018 - 15/11/2020
Onaylanan Bütçe:	100500.0
Harcanan Bütçe:	58558.28
Öz:	<p>İnconel 718 savunma sanayi, uzay-havacılık ve otomotiv için kullanılan ve ileride kullanım alanı daha da genişleyebilecek olan süper alaşımdır. Bu projede Inconel 718 süper alaşımının talaşlı imalat sonucunda yüzeyinde oluşan kalıntı gerilimler, sertlik değişimleri ve kesici takımında oluşan aşınmalar gözlenmiştir. Talaşlı imalat simülasyonları için kullanılan Deform 2D programına, klasik Johnson-Cook malzeme modeli yerine, kristal plastisite tabanlı çok ölçekli malzeme davranışı tanıtilarak daha kapsamlı ve deneysel veriye daha yakın analizler yapılmıştır. Bu konunun seçilme nedeni, gerçek deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilip beklenmedik üretim hataları ve denemeleri en aza indirebilecek bir yöntem geliştirmektir. Bugüne kadar gerçekleştirilen talaşlı imalat simülasyonlarında malzeme davranışı genellikle tek ölçekli gerinim pekleşmesi, gerinim hızı pekleşmesi ve sıcaklık yumuşamasını kapsayan Johnson-Cook malzeme modelleri ile gerçekleştirilmiştir ve bu modeller malzemelerin mikroyapısal girdilerini içermemektedir. Bu projede ise Johnson-Cook malzeme modeli ile ve karşılaştırmalı olarak çok ölçekli kristal plastisite tabanlı malzeme modeli ile 2D deform programında farklı kesme hızlarında ve farklı ilerleme hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu projede ilk olarak, Inconel 718 malzemesinin talaşlı imalat deneylerini yapılarak sonuçları gözlenmiştir. Daha sonra Johnson-Cook malzeme modellemesiyle gerçekleştirilen simülasyon sonuçları gözlenmiştir. Son olarak da Inconel 718 süper alaşımının kristal plastisite modelinin yapılması ve mikroyapı girdileri ile elde edilen kristal plastisite modeli ile çıkarılan çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışının Deform 2D simülasyonlarına tanıtilarak simülasyonu gerçekleştirip, elde edilen sonuçlar gözlenmiştir. Yapılan simülasyonlar ve deney sonucunda, iki farklı malzeme modelin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Mikroyapı girdileri ile elde edilen kristal plastisite modeli ile çıkarılan çok ölçekli ve çok eksenli malzeme davranışının, tek ölçekli malzeme davranışı ile karşılaştırıldığında deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylelikle çok ölçekli malzeme modellemesiyle gerçekleştirilen simülasyonların daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar gösterdiği kanıtlanmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Johnson Cook, Kristal Plastisite, Deform 2D, Sonlu elemanlar analizi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet