

AISI 4140 Çeliğinin Delinmesinde Matkap Uç Geometrisi Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizinde Johnson-Cook Malzeme Modeli ve Yazılım Kütüphanesi Sonuçlarının Kıyaslanması

Tuncer DEMİREL^{1,2,*} Kutay AYDIN³ Gökhan DELİORMAN⁴ Abdullah KURT⁵

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

³Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye

⁴Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş., Mühendislik Bölümü, Eskişehir, Türkiye

⁵Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 06/12/2025

Revision: 22/01/2026

Accepted: 16/02/2026

Keywords

AISI4140

Drilling

Drill Bit Geometry

Machinability

Finite Element Method

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 06/12/2025

Düzeltilme: 22/01/2026

Kabul: 16/02/2026

Anahtar Kelimeler

AISI4140

Delme

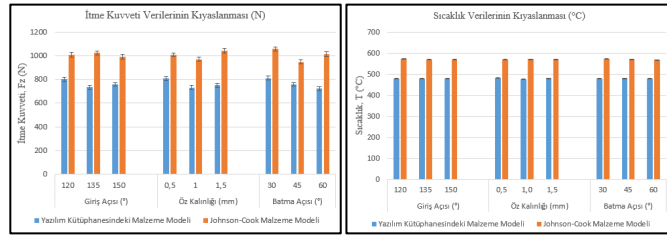
Matkap Uç Geometrisi

İşlenebilirlik

Sonlu Elemanlar Metodu

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinin delinmesinde matkap uç geometrisinin etkileri J-C ve kütüphane modelleriyle kıyaslanmıştır; J-C modelinin kuvvet ve sıcaklık değerlerinde fiziksel gerçekliğe daha yakın sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir. / In this study, the effects of drill bit geometry on drilling AISI 4140 steel were compared using J-C and library models, identifying that the J-C model provides results closer to physical reality in force and temperature values.



Şekil A: Grafik özet / Figure A: Graphical abstract

Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinin delinmesinde matkap uç geometrisi parametrelerinin etkileri incelenmiştir. / In this study, the effects of drill bit geometry parameters on the drilling of AISI 4140 steel were investigated.
- Johnson-Cook malzeme modeli ile yazılım kütüphanesindeki standart veriler karşılaştırılmıştır. / The Johnson-Cook material model and standard data in the software library were compared.
- J-C modeli için G24, kütüphane verileri için ise G15 kodlu matkap geometrisi optimum sonuçları vermiştir. / The G24-coded drill geometry for the J-C model and the G15-coded drill geometry for the library data yielded the optimal results.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, simülasyon yazılımının kütüphanesindeki hazır veriler ile Johnson-Cook malzeme modelini performans bazlı kıyaslamaktır. / The purpose of this study is to compare the Johnson-Cook material model with the ready-made data in the simulation software library based on performance.

Özgünlük (Originality): AISI 4140 delme simülasyonlarında Johnson-Cook (J-C) modeli ile yazılım kütüphanesi verilerini kapsamlı bir şekilde kıyaslayan ilk çalışma olmasıdır. / The originality of the study is that it is the first comprehensive comparison of the Johnson-Cook (J-C) model and software library data in AISI 4140 drilling simulations.

Bulgular (Results): J-C malzeme modeli, standart kütüphane verilerine göre itme kuvveti, tork ve sıcaklık değerlerini daha yüksek tahmin ederek fiziksel gerçekliğe daha yakın sonuçlar sunmuştur. / The J-C material model provided results closer to physical reality by estimating higher thrust force, torque, and temperature values compared to standard library data.

Sonuç (Conclusion): AISI 4140 delme simülasyonlarında Johnson-Cook modelinin fiziksel gerçekliğe daha yakın sonuçlar sunduğu ve model seçiminin optimum geometriyi belirlemede kritik olduğu sonucuna varılmıştır. / It was concluded that the Johnson-Cook model offers results closer to physical reality in AISI 4140 drilling simulations, and model selection is critical for determining the optimal geometry.



AISI 4140 Çeliğinin Delinmesinde Matkap Uç Geometrisi Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizinde Johnson-Cook Malzeme Modeli ve Yazılım Kütüphanesi Sonuçlarının Kıyaslanması

Tuncer DEMİREL^{1,2,*} Kutay AYDIN³ Gökhan DELİORMAN⁴ Abdullah KURT⁵

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

³Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye

⁴Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş., Mühendislik Bölümü, Eskişehir, Türkiye

⁵Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/12/2025
Düzeltilme: 22/01/2026
Kabul: 16/02/2026

Anahtar Kelimeler

AISI4140
Delme
Matkap Uç Geometrisi
İşlenebilirlik
Sonlu Elemanlar Metodu

Öz

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinin delinme sürecinde matkap uç geometrisini oluşturan unsurlardan; batma açısı, öz kalınlığı ve giriş açısının delinebilirlik üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi destekli simülasyonlarla analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında; 6,8 mm çapında, iki ağızlı, helisel yapıda, split uçlu ve yekpare karbür matkap modelleri kullanılmıştır. Geometrik parametreler; batma açısı (30°, 45°, 60°), öz kalınlığı (0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm) ve giriş açısı (120°, 135°, 150°) olacak şekilde çeşitlendirilmiştir. Çalışmanın temel odağını, yazılım kütüphanesindeki hazır AISI 4140 verileri ile yazılıma tanımlanan Johnson-Cook (J-C) malzeme modelinin performans bazlı kıyaslanması oluşturmaktadır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen itme kuvveti, delme momenti (tork), sıcaklık, gerilme, talaş morfolojisi ve gerilme dağılımları verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, J-C malzeme modeli ile kütüphane verileri arasında %80'in üzerinde bir benzerlik oranı olduğunu ortaya koymuştur. Tam faktöriyel deney tasarımı sonuçlarına göre; J-C modelinde G24, kütüphane verilerinde ise G15 kodlu matkap geometrisi optimum sonuçları vermiştir. Ayrıca, her iki modelleme yönteminde de oluşan talaş şekillerinin ve gerilme dağılımlarının birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

Comparison of Johnson-Cook Material Model and Software Library Results in Finite Element Analysis of the Effect of Drill Bit Geometry on the Drilling of AISI 4140 Steel

Article Info

Research article
Received: 06/12/2025
Revision: 22/01/2026
Accepted: 16/02/2026

Keywords

AISI4140
Drilling
Drill Bit Geometry
Machinability
Finite Element Method

Abstract

This study investigates the effects of drill bit geometry parameters—specifically notch angle, web thickness, and splitting angle—on the drillability of AISI 4140 steel using finite element analysis (FEA) simulations. Solid carbide drill models with a 6.8 mm diameter, double-fluted, helical, and split-tip structure were utilized in the research. The geometric parameters were varied as follows: notch angles of 30°, 45°, and 60°; web thicknesses of 0.5 mm, 1.0 mm, and 1.5 mm; and splitting angles of 120°, 135°, and 150°. The primary focus of the study is a performance-based comparison between the standard AISI 4140 material data from the software library and the Johnson-Cook (J-C) material model defined in the software. Thrust force, torque, temperature, stress distributions, and chip morphology data obtained from the simulations were evaluated comparatively. The findings revealed a similarity rate of over 80% between the J-C material model and the library data. Based on the full factorial design results, the G24-coded drill geometry for the J-C model and the G15-coded drill geometry for the library data yielded the optimal results. Furthermore, it was determined that the chip shapes and stress distributions formed in both modeling approaches were highly consistent with each other.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat yöntemleri içerisinde delik delme işlemi, parçaların montaj hassasiyeti ve yapısal bütünlüğü açısından kritik bir aşamayı temsil etmektedir. Kumar ve ark. [1], delme işleminin havacılık ve otomotiv gibi pek çok endüstride en yaygın kullanılan operasyonlardan biri olduğunu, ancak yüzey kalitesi ve takım aşınması gibi kısıtlar nedeniyle sürekli bir optimizasyon gerektirdiğini belirtmişlerdir. Patel ve Verma [2], delme performansının sadece kesme parametrelerine değil, aynı zamanda matkap malzemesi ve geometrisi gibi faktörlere de doğrudan bağlı olduğunu, bu parametrelerin takım ömrü üzerinde belirleyici rol oynadığını vurgulamışlardır. Bayraktar ve ark. [3], delme operasyonları üzerine yaptıkları derleme çalışmasında; aşırı yüzey pürüzlülüğü, eksenel kaçıklık ve hızlı takım aşınması gibi istenmeyen sonuçların ancak optimum parametre ve geometri seçimiyle en aza indirilebileceğine dikkat çekmişlerdir. Kim ve Ramulu [4], delme işlemlerinde maliyet ve kalite dengesinin kurulması için kesme hızı ve ilerleme miktarının çok amaçlı optimizasyon teknikleriyle belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Metal kesme prensiplerini temel düzeyde ele alan Trent [5], kesici kenar üzerindeki gerilmelerin ve sıcaklık dağılımının talaş oluşum mekanizmasını doğrudan etkilediğini ifade etmiştir. Matkap uç geometrisinin matematiksel analizi üzerine klasikleşmiş bir çalışma sunan Fujii ve ark. [6], öz (chisel edge) kenar geometrisinin matkap performansı üzerindeki etkisini modelleyerek en iyi performans için optimum geometrik değerlerin varlığını kanıtlamışlardır. Shu ve ark. [7], matkap ucu tasarımındaki yeniliklerin, özellikle öz inceltme (web thinning) tasarımlarının termomekanik yükleri bastırarak kesme mekanizmasını iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Çalışmanın odağında yer alan AISI 4140 çeliği, yüksek mukavemeti ve tokluğu nedeniyle otomotiv ve uçak sanayi gibi dinamik yüklerin yüksek olduğu alanlarda referans malzeme olarak kabul edilmektedir. Malzemenin mekanik özellikleri, ısı işlem ve mikroyapı değişimleriyle yakından ilişkilidir. Kahng [8], AISI 4140 çeliği üzerinde yaptığı performans testlerinde farklı matkap tasarımlarının itme kuvveti ve moment karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Baak ve ark. [9], derin delik delme işleminin AISI 4140 çeliğinin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini analiz ederek, yüzey altı tabakalardaki değişimlerin mekanik ömrü doğrudan etkilediğini raporlamışlardır. Nickel ve ark. [10], malzemedeki

kükürt oranının ve ilerleme miktarının yorulma direnci üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamışlardır. Meral ve ark. [11], yeni tasarlanmış matkap geometrilerinin AISI 4140 delik kalitesi üzerindeki etkilerini Taguchi yöntemiyle optimize ederek geometrik unsurların dairesellik ve silindiriklik üzerindeki kritik önemini göstermişlerdir. Açı ve ark. [12], AISI 4140 çeliği için kesme kenarı radyüsünün ve parametrelerin optimizasyonu sayesinde takım ömründe %20 artış sağlamışlardır. Yavuz ve ark. [13], farklı matkap geometrilerinin performansını kıyaslayarak itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki iyileşmeleri ortaya koymuşlardır. Çavuş ve ark. [14], split uçlu matkaplarda yarı talaş açısının itme kuvveti ve delme momenti üzerindeki etkilerini deneysel ve teorik olarak irdelemişlerdir.

Sayısal analizlerin gelişimi, deneysel süreçlerin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile desteklenmesini zorunlu kılmıştır. Abele ve Fujara [15], simülasyon tabanlı bir yöntemle matkap geometrisini optimize ederek tork ve itme kuvvetini hesaplayan modeller geliştirmişlerdir. Yıldız ve ark. [16], Deform-3D yazılımı kullanarak delme sırasında oluşan gerilmeleri ve kesme yüklerini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. Svensson ve ark. [17], AISI 4140 çeliğinin delinmesinde Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) simülasyonlarını kullanarak itme kuvveti, tork ve sıcaklık dağılımını başarıyla öngörmüşlerdir. Andersson ve ark. [18], AISI 4140 çeliği için değişken ısı yükleri tanımlayan ileri düzey simülasyon modelleri sunmuşlardır. Yusubov [19], AISI 4140 çeliğinin simüle edilmiş delme ortamlarındaki korozyon ve aşınma davranışlarını inceleyerek, çevresel faktörlerin kütle kaybı ve yüzey bozulması üzerindeki etkilerini raporlamıştır.

Krivokapić ve ark. [20], delme sırasındaki tork verilerini girdi olarak kullanarak yüzey pürüzlülüğünü yapay sinir ağları ile modellemişlerdir. Şahin ve Kaluç [21], katı karbür matkaplarla yapılan delme işlemlerinde kesme hızı ve ilerlemenin takım aşınması üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymuştur. De Bartolomeis ve ark. [22], talaşlı imalatta gelecek araştırma yönlerini tartışırken matkap uç geometrisi ve malzeme modellerinin hassasiyetine vurgu yapmışlardır.

Bu çalışmada, sanayide yaygın kullanılan AISI 4140 çeliğinin delinmesinde matkap uç geometrisini oluşturan unsurlardan; batma açısı, öz kalınlığı ve giriş açısının etkileri sonlu elemanlar destekli simülasyonlarla incelenmiştir. Literatürde genellikle deneysel yöntemler veya tekil malzeme

tanımlamaları ön planda olsa da, simülasyon çıktılarının doğruluğu büyük oranda malzeme modelinin gerçekçi tanımlanmasına bağlıdır. Çalışmanın özgünlüğü, AISI 4140 çeliği için literatürde sıkça kullanılan Johnson-Cook (J-C) malzeme modelinin, yazılım kütüphanesindeki standart malzeme verileri ile itme kuvveti, tork, sıcaklık, matkapta oluşan gerilmeler ve talaş formu bazında ilk kez bu kapsamda karşılaştırılmasıdır. Toplam 54 farklı (27 adet programın malzeme kütüphanesindeki malzemeye modeline göre, 27 adet de J-C malzeme modeli programa tanımlanarak) simülasyon kombinasyonu üzerinden gerçekleştirilen bu analiz, matkap uç geometrisindeki varyasyonların farklı malzeme

tanımlama yöntemleri altında sergilediği tutarlılığı ortaya koyarak gelecekteki simülasyon çalışmaları için kritik bir referans oluşturmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak sanayide yaygın bir kullanım alanına sahip olan AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliği seçilmiştir. AISI 4140 malzemesi AdvantEdge yazılım kütüphanesinde bulunmaktadır. AISI 4140 çeliğinin kimyasal bileşimi yazılımda belirtildiği şekilde Tablo 1'de sunulmuştur [23].

Tablo 1. AISI4140 çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI4140 steel)

Elementler	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	Fe
Min % Ağırlık	0.380	0.800	0.750	0.150	-	-	0.150	Kalan
Max % Ağırlık	0.430	1.100	1.000	0.250	0.035	0.040	0.030	Kalan

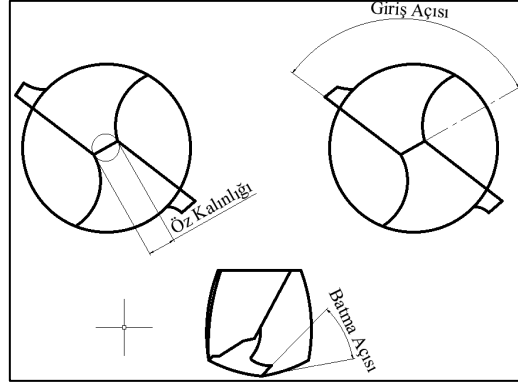
Simülasyon çalışmaları; 6.8 mm çapında, uç açısı 138°, iki ağızlı, 30° helis açılı, split uçlu solid karbür matkaplar ile gerçekleştirilmiştir. Bu

matkaplara, kalınlığı 0.003 mm olan TiAlN kaplama tanımlanmıştır. Matkap uç geometrilerinin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Split uçlu matkapların geometrik özellikleri (Geometric characteristics of split-point drills)

Parametreler	Değerler
Matkap çapı (mm)	6.8
Sap çapı (mm)	8
Matkap uç açısı (°)	138
Giriş açısı (°)	120/135/150
Öz kalınlığı (mm)	0,5/1,0/1,5
Batma açısı (°)	30/45/60
Helis açısı (°)	30

Bu çalışmada irdelenen; giriş açısı, öz kalınlığı ve batma açısı şematik gösterimleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Matkap uç geometrik unsurları şematik gösterimi (Schematic representation of drill bit geometric elements)

AISI 4140 çeliğinin delinmesinde matkap uç geometrisinin ve malzeme modelleme yönteminin işleme performansına etkilerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir simülasyon seti tasarlanmıştır. Çalışmanın metodolojik altyapısı, tüm parametre etkileşimlerini gözlemlemeye olanak tanıyan Tam Faktöriyel Deney Tasarımı (Full Factorial Design) üzerine kurulmuş olup, Tablo 3'te verilmiştir. Bu tasarım sonucunda, her bir malzeme

modeli için 27 farklı matkap uç geometrisi (3x3x3) oluşturulmuş; her iki malzeme modeli için toplamda 54 adet (27 x 2) bağımsız simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu sistematik yaklaşım, matkap geometrisindeki mikro değişimlerin itme kuvveti, tork ve sıcaklık gibi çıktılar üzerindeki etkisinin hem kütüphane verileriyle hem de fizik tabanlı J-C modeliyle yüksek hassasiyetle kıyaslanmasını sağlamıştır.

Tablo 3. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı (Full Factorial Experiment Design)

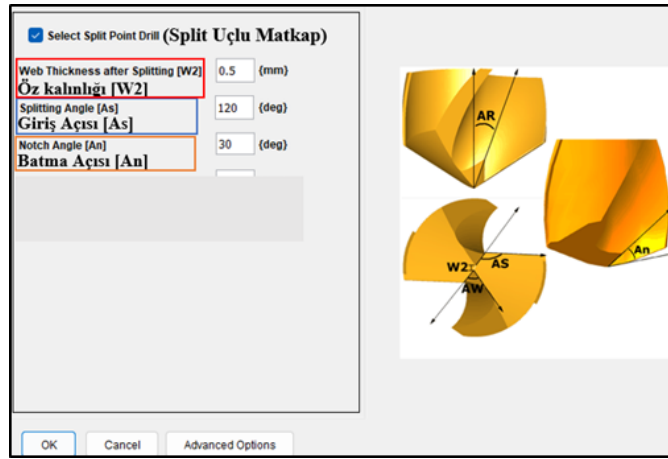
Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Giriş Açısı (As), (°)	120	135	150
Öz Kalınlığı (W2), mm	0,5	1,0	1,5
Batma Açısı (An),	30	45	60
Malzeme Modeli	Yazılım Kütüphanesi	Johnson-Cook	-

Literatür incelenerek ve kesici takım firması önerileri dikkate alınarak, AISI4140 çeliğini delmek için; 100 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme değeri kullanılmıştır [14, 28]. Çalışma kapsamında matkap uç geometrik unsurlarından giriş açısı, öz kalınlığı ve batma açısı araştırıldığından dolayı, kesme hızı ve ilerleme değeri sabit tutulmuştur. Matkap uç geometrik unsurları ise; giriş açısı (120°,135°,150°), öz kalınlığı (0,5;1,0;1,5 mm) ve batma açısı (30°,45°,60°) şeklinde çeşitlendirilmiştir. Bu matkap tasarımları ile AdvantEdge yazılımı standart kütüphane verileri ve yazılıma tanımlanan Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli verileri arasındaki

farkı ortaya koymak üzere delme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen; itme kuvveti verileri, tork ve sıcaklık değerleri, gerilme dağılımları ve talaş şekilleri karşılaştırılmıştır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi

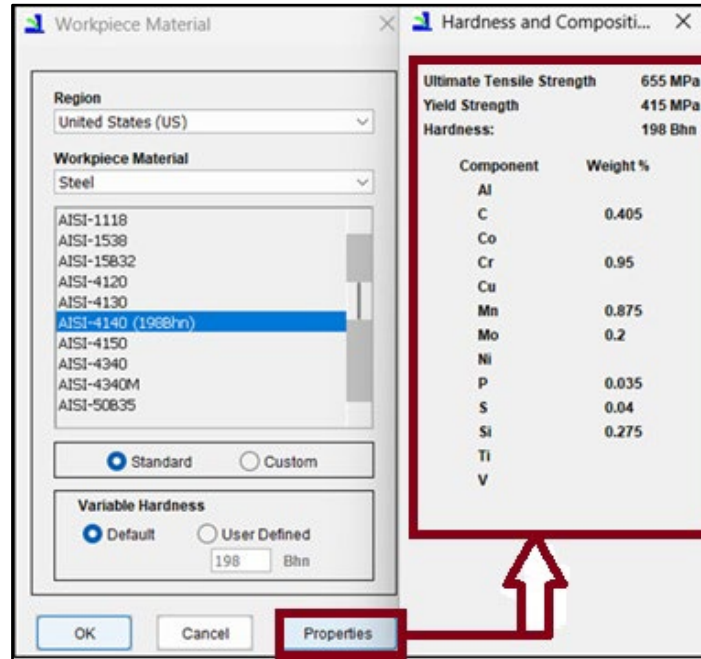
Sayısal analizler, talaşlı imalat simülasyonlarında uzmanlaşmış Lagrangian tabanlı Third Wave AdvantEdge yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Split uçlu matkapların modellemelerinin yapıldığı geometrik parametreler penceresi Şekil 2'de gösterilmektedir [23].



Şekil 2. Split uçlu matkap uç geometrisi modelleme penceresi (Split point drill bit geometry modeling window)

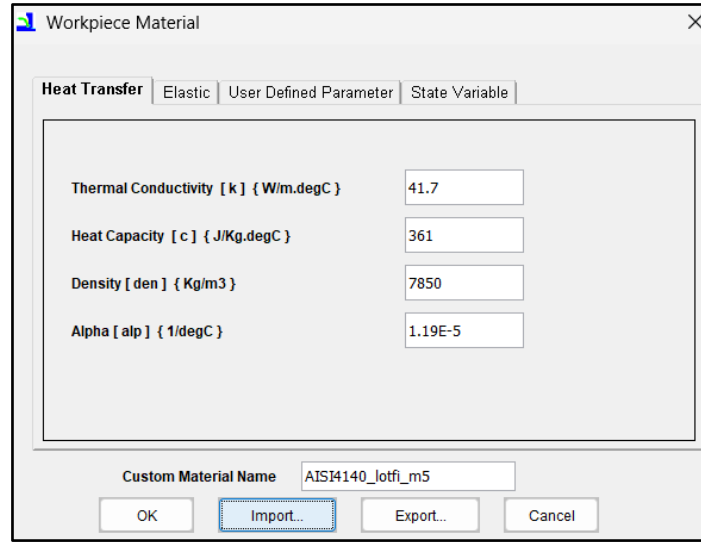
AdvantEdge yazılımı birçok malzemeyi kütüphanesinde bulundurmaktadır. Ayrıca, Johson-Cook malzeme modeli parametreleri de özel malzeme olarak yazılıma tanımlanabilmektedir. AdvantEdge yazılımı malzeme kütüphanesinden

malzemenin seçilebileceği pencere Şekil 3'te sunulmuştur. Aynı pencereden kütüphanedeki malzemelerin kimyasal bileşimini "Properties" ikonu tıklanarak görüntülenebilmektedir.



Şekil 3. AdvantEdge yazılımı malzeme kütüphanesi (AdvantEdge software material library)

Johnson-Cook malzeme modeli parametrelerinin yazılıma tanımlanabileceği giriş ekranı Şekil 4'te gösterilmektedir [23].



Şekil 4. J-C Malzeme modeli giriş penceresi (J-C Material Model Input Window)

AdvantEdge yazılım kütüphanesinde bulunan malzemeler için malzeme modeli olarak Eşitlik 1'de verilen formülasyonu kullanmaktadır [24].

$$\sigma(\varepsilon_p, J_1, \dot{\varepsilon}^p, T) = [g(\varepsilon^p) + DP_0 * J_1] * \Gamma(\dot{\varepsilon}^p) * \theta(T) \quad (1)$$

Eşitlik 1'de verilen formülasyondaki; σ akış gerilimi, ε_p plastik gerinim, J_1 hidrostatik basınç, $\dot{\varepsilon}^p$ gerinim hızı, T sıcaklık, $g(\varepsilon^p)$ gerinim sertleşmesi, DP_0 hidrostatik gerilme katsayısı, $\Gamma(\dot{\varepsilon}^p)$ gerinim hızı duyarlılığı, $\theta(T)$ termal yumuşama olarak tanımlanmaktadır.

Ayrıca yazılım malzeme işleme simülasyonlarında yaygın olarak tercih edilen Johnson-Cook (J-C)

malzeme modelinin de yazılıma tanımlanmasına olarak sunmaktadır. Eşitlik 2'de J-C malzeme modeli formülasyonu açıklanmaktadır [25].

$$\sigma^0 = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[1 + C \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \right] \quad (2)$$

Mekanik testler aracılığıyla elde edilen ve Eşitlik 2'de bulunan A, B, C, n ve m parametreleri sırasıyla; oda sıcaklığındaki akma gerilmesi, gerinim sertleşme katsayısı, gerinim hızı sabiti, gerinim sertleşme sabiti ve ısıl yumuşama sabiti olarak tanımlanır. AISI 4140 çeliği için Johnson-Cook malzeme modeli Tablo 4'te verilmiştir [26, 27].

Tablo 4. AISI 4140 çeliği için Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri (Johnson-Cook material model parameters for AISI 4140 steel)

Parametreler	Değerler
A (Mpa)	598
B (MPa)	768
C	0.0137
n	0.2092
m	0.807

Kesici takım malzemesi olarak AdvantEdge yazılımının takım kütüphanesinde bulunan genel karbür matkap kullanılmıştır. Takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının simülasyon sonuçları üzerinde önemli etkileri olabilir. AdvantEdge yazılımı, aşağıdaki denklemde

Coulomb sürtünmesi ile tanımlanan bir sürtünme katsayısı kullanır [23]. Eşitlik 3'te Coulomb modeli verilmiştir.

$$F_f = \mu \cdot F_n \quad (3)$$

Burada; F_n yüzeyler arasında uygulanan normal kuvvettir, μ sürtünme katsayısıdır ve F_f sürtünmeden kaynaklanan sonuç kuvvettir.

Takım ve iş parçası arasındaki arayüzey durumu için Coulomb sürtünme modeli, yazılım tavsiyesine ve literatür taramasına göre belirlenmiş olup, Coulomb sürtünme katsayısı 0,5 olarak kullanılmıştır [23, 27-30].

Sonlu elemanlar yöntemi destekli sanal simülasyon çalışmaları için birinci grupta iş parçası malzemesi olarak yazılım kütüphanesinden AISI4140 çeliği seçilmiştir [23]. İkinci grup simülasyonlarda iş parçası malzemesi olarak AISI4140 çeliğine ait J-C malzeme modeli parametreleri yazılıma tanıtılmıştır [26]. Malzeme boyutları, yazılımın kullanıcılar için hazırladığı “user manuel” pdf’indeki tavsiyeler ve literatürdeki “iş parçası genişlik ve uzunluk ölçülerinin matkap çapından en az iki kat büyük

olması gerekliliği” bilgileri ışığında 15x6x15 mm olarak belirlenmiştir [14, 23].

Simülasyon süresi, matkabın iş parçası üzerinde tam bir devir (360° derece) yapacağı şekilde ayarlanmıştır. Bu yaklaşım, kesme başlangıcındaki kararsız kuvvetlerin aşılmasını ve verilerin kararlı rejimde analiz edilmesini sağlamıştır. Bir tam turluk rotasyon, matkap uç geometrisindeki geometrik farklılıkların (batma açısı, öz kalınlığı vb.) itme kuvveti ve moment üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymak için yeterli bir periyottur.

Doğru sonuçlar elde etmek için minimum eleman boyutunun doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, Literatürdeki önceki çalışmalar dikkate alınarak [14], bir dizi pilot sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek doğrulama testleri yapılmış olup, Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Sonlu elemanlar analizi uygun eleman boyutunu belirlemek için yakınsama testleri (*Finite element analysis convergence tests to determine the appropriate element size*)

İş parçası minimum eleman boyutu	Kesici takım minimum eleman boyutu	Ağ yenileme faktörü	Ağ kabalaşma faktörü	İtme kuvvetleri Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları (N)	İtme Kuvvetleri Deney Sonuçları (N) [14]	Hata Oranı (%)
10	0,05	20	1	1286,38	787,55	38,78
7	0,05	20	1	1193,53	787,55	34,02
4	0,03	20	1	1053,27	787,55	25,23
1	0,03	20	1	1017,78	787,55	22,63
0,5	0,03	20	1	979,07	787,55	19,57
0,1	0,025	20	1	893,52	787,55	11,15
0,05	0,025	20	1	856,38	787,55	8,04
0,025	0,025	20	1	749,07	787,55	4,89

Bu doğrultuda, Sonlu elemanlar analizleri için minimum eleman boyutunları yakınsama testleri ile belirlenmiş olup, Tablo 6'da malzeme için, Tablo 7'de matkap için verilmiştir.

Tablo 6. İş parçası mesh parametreleri (Parameters of workpiece mesh)

İş parçası mesh parametreleri	Boyutlar
Maksimum Eleman boyutu	0.3 mm
Minimum Eleman boyutu	0.025 mm
Dönme açısı	360°
Mesh Derecelendirmesi	0.2 mm
Eğrilik güvenliği	2.5 mm
Kenar başına segmentler	2 mm
Minimum kenar uzunluğu	2E-4 mm
İşleme başlangıç sıcaklığı (oda sıcaklığı)	20 °C
Uyarlanabilir Remeshing Parametreleri	
Min. Elem. kenar uzunluğu (talaş yığıcı)	0.0396 mm
Min. Elem. kenar uzunluk (oluk kenarı)	0.0303 mm

Tablo 7. Matkap mesh parametreleri (Drill mesh parameters)

Matkap mesh parametreleri	Boyutlar
Maksimum Eleman boyutu	0.3 mm
Minimum Eleman boyutu	0.025 mm
Dönme açısı	360°
Mesh Derecelendirmesi	0.4 mm
Eğrilik güvenliği	1.5 mm
Kenar başına segmentler	0.5 mm
Minimum kenar uzunluğu	2E-4 mm

3.DELME SİMÜLASYONLARI SONUCUNDA ELDE EDİLEN VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE DATA OBTAINED AS A RESULT OF DRILLING SIMULATIONS)

3.1. İtme Kuvveti Verilerinin Analizi (Analysis Of Thrust Force Data)

Elde edilen analiz sonuçları (Şekil 5), matkap uç geometrisindeki değişimlerin ve malzeme modellenmesi yaklaşımının (Yazılım Kütüphanesi vs. Johnson-Cook) itme kuvveti (Fz) üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Geometrik parametrelerin etkileri literatür ışığında aşağıda irdelenmiştir.

Grafikte 120°'den 150°'ye değişen giriş açılarında itme kuvvetlerinin birbirine yakın seyrettiği, ancak 135° ve 150° açılarda J-C modelinde hafif bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde Patel ve Verma, 150° gibi daha geniş uç açılarının çelik gibi sert malzemelerin delinmesinde daha verimli olduğunu, ancak bu durumun aksel kuvvet bileşenini etkileyebileceğini belirtmişlerdir [2]. Teorik olarak uç açısının artması, kesme kenarının uzunluğunu kısaltırken, kuvvetin aksel bileşenini artırma eğilimindedir. Ancak Ema, uç açısındaki artışın belirli koşullarda itme kuvvetini düşürebileceğini de not etmiştir [31]. Çalışmamızda J-C modelinin bu açılarda 1000 N bandında stabil sonuçlar vermesi, modelin yüksek mukavemetli AISI 4140 çeliğinin sertleşme davranışını uç

geometrisindeki değişimlere karşı duyarlı bir şekilde simüle ettiğini göstermektedir.

Grafik incelendiğinde, her iki malzeme modelinde de öz kalınlığının 1,0 mm'den 1,5 mm'ye artışının itme kuvvetinde belirgin bir yükselişe neden olduğu görülmektedir. Literatürde Kahng tarafından yapılan çalışmada, delme işlemindeki toplam itme kuvvetinin yaklaşık %45 ile %60'ının matkap öz kalınlığındaki "ezme" ve sürtünme mekanizmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [8]. Benzer şekilde Ema ve Yavuz vd., öz kalınlığındaki artışın itme kuvvetini önemli ölçüde artırdığını, çünkü bu bölgenin kesme işleminden ziyade malzemeyi dışarı doğru iterek deforme ettiğini raporlamışlardır [13, 31].

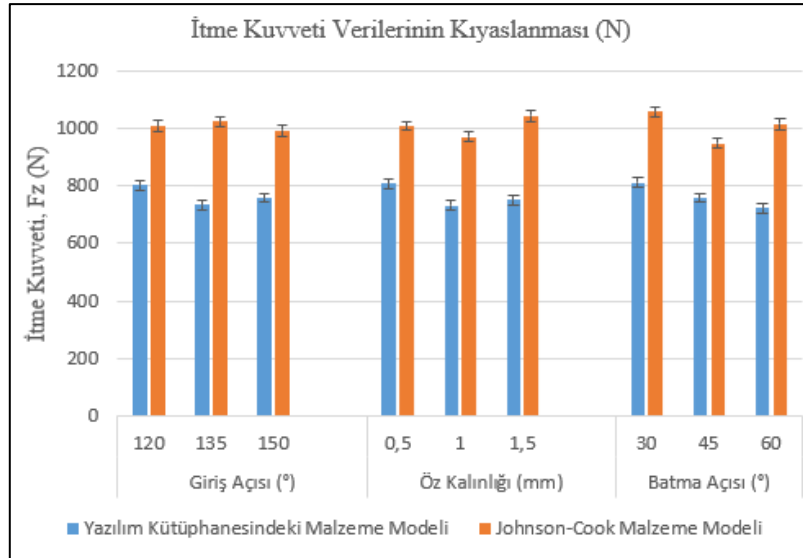
Analizlerimizde 1,5 mm öz kalınlığında görülen yüksek kuvvet değerleri (Fz, J-C \approx 1050 N), Abele ve Fujara'nın belirttiği gibi, matkap merkezi etrafındaki "batma/ezme bölgesi" genişlemesiyle açıklanabilir [15]. Johnson-Cook modelinin, bu bölgedeki yüksek plastik deformasyon direncini standart kütüphane modeline göre daha hassas yansıtması nedeniyle daha yüksek (ve literatüre daha uyumlu) kuvvet değerleri ürettiği değerlendirilmektedir.

Batma açısının 30°'den 60°'ye değişimi incelendiğinde, özellikle Yazılım Kütüphanesi

verilerinde (Mavi sütunlar) kuvvetin düştüğü, J-C modelinde ise 45°'de minimum seviyeye inip 60°'de tekrar yükseldiği görülmektedir. Fujii vd., matkap ucu profilinin ve açısının, matkabın malzemeye ilk temas anındaki performansını ve itme kuvvetini doğrudan etkilediğini matematiksel olarak ortaya koymuştur [6]. Bayraktar vd. ise delme işleminin radyal ağzın (zırh bölgesi) malzemeyi ezerek başladığını ve bu bölgedeki geometrinin ilerleme kuvvetini belirlediğini vurgulamışlardır [3].

Grafikteki veriler, 45° batma açısının, AISI 4140 malzemesi için "ezme" ve "kesme" geçişinde optimum bir geometri sunduğunu işaret etmektedir. J-C modelinin 60°'de tekrar yüksek kuvvet tahmin etmesi, bu dik açıda malzeme akışının zorlaşması ve sürtünme kaynaklı kuvvet artışları ile ilişkilendirilebilir.

Tüm parametreler dikkate alındığında, Johnson-Cook malzeme modeli (Turuncu sütunlar), Svensson vd. tarafından da belirtildiği üzere, standart kütüphane verilerine (Mavi sütunlar) kıyasla itme kuvvetlerini daha yüksek tahmin etmiştir. Standart modellerin itme kuvvetini %20'ye varan oranlarda eksik tahmin ettiği bilindiğinden, J-C modelinin ürettiği sonuçların AISI 4140 çeliğinin gerçekçi kesme mekaniğini, özellikle öz (web) bölgesindeki ezme etkisini, daha doğru temsil ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. İtme kuvveti verilerine göre; J-C malzeme modeli ve Yazılım kütüphanesi tam faktöriyel etki grafikleri (According to the thrust force data; J-C material model and Software library full factorial effect graphs)

Tablo 8'de, farklı matkap uç geometrileri (G1-G27) için AdvantEdge yazılım kütüphanesindeki standart malzeme modeli ile literatürden derlenen katsayılarla oluşturulan Johnson-Cook malzeme modelinin ürettiği itme kuvveti (Fz) değerleri ve analizlerin yakınsama yüzdeleri karşılaştırılmıştır.

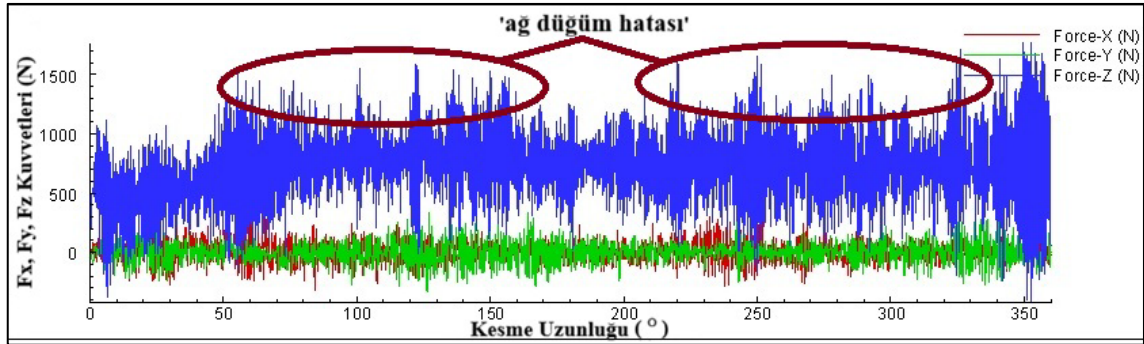
Tablo 8'de, J-C malzeme modeli ile yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler "en küçük değer iyidir" yaklaşımıyla incelendiğinde optimum sonuçlar; giriş açısının 135°, öz kalınlığının 1,5 mm ve batma açısının 60° olduğu G18 kodlu matkaptan elde edilmiştir. Malzemenin

yazılım kütüphanesinden seçildiği simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere bakıldığında ise optimum sonuçlar; giriş açısının 120° , öz kalınlığının 1 mm ve batma açısının 60° derece olduğu G6 kodlu matkaptan elde edilmiştir.

İtme kuvveti analizlerinde 135° uç açısına sahip G8, G10, G12, G14 ve G15 geometrilerinde standart kütüphane verileriyle karşılaşılan düşük yakınsama (%60) ve simülasyonun erken sonlanması, literatürde 'aşırı eleman bozulması' (severe element distortion) ve 'ağ düğüm hatası' (mesh node error) olarak tanımlanan sayısal kararsızlık durumunu ifade etmektedir. Delme işleminin doğası gereği, özellikle matkap ucunun iş parçasına batma bölgesinde çok yüksek plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Yıldız ve ark., Deform-3D gibi Lagrangian tabanlı sonlu elemanlar yazılımlarında, elemanların aşırı deformasyona uğrayarak "negatif Jacobian" (kullanılamaz ağ yapısı) hatası oluşturduğunu ve yazılımın bu durumu düzeltmek için sürekli "yeniden ağ örme" (re-meshing) işlemine başvurduğunu belirtmişlerdir [16]. Ancak, 135° gibi geniş uç açıları ve belirli öz kalınlıklarında, matkap ucundaki ezme (indentation) bölgesindeki gerilmeler, standart

malzeme kütüphanesindeki akış gerilmesi (flow stress) verileriyle yönetilemeyecek kadar ani artışlar gösterebilmektedir. Bu durum, Oezkaya ve Biermann tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir. Yazarlar, matkap ile iş parçası arasındaki karmaşık temas koşullarının, ağ yapısında düğüm hatalarına (mesh node errors) yol açtığını ve bunun tork/kuvvet grafiklerinde ani ve gerçekçi olmayan sapmalar (discontinuities) yaratarak simülasyonu kilitlediğini (yakınsamayı engellediğini) ifade etmişlerdir [32].

Çalışmamızda bahsi geçen "mesh yenilemesi bozulmaları" (Şekil 6); standart malzeme modelinin yüksek deformasyon hızlarında yetersiz kalması sonucu, ağ yapısının (mesh) fiziksel deformasyonu takip edememesi ve yeniden ağ örme algoritmasının (remeshing algorithm) eleman penetrasyonunu çözemeyerek analizi durdurması sürecidir. Buna karşın, literatür destekli Johnson-Cook modeli, malzemenin bu zorlu koşullardaki sertleşme davranışını daha doğru tanımladığı için, ağ yapısının bozulmadan (distortion) plastik akışa uyum sağlamasına olanak tanımış ve yakınsama oranını artırmıştır.



Şekil 6. Simülasyon sırasında yazılım ağ yapısını yenilerken oluşan bozulmalar (Distortions that occur during the simulation when the software renews the network structure)

Tablo 8. İtme kuvveti sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of thrust force results)

Matkap kodu	Giriş açısı ($^\circ$)	Öz kalınlığı (mm)	Batma açısı ($^\circ$)	AdvantEdge malzeme kütüphanesi Fz (N)	J-C malzeme modeli Fz (N)	Yüzde yakınsama (%)
G1	120	0,5	30	876,564	1105,402	79,30
G2	120	0,5	45	689,187	865,504	79,63
G3	120	0,5	60	891,986	1088,770	81,93
G4	120	1	30	683,561	862,897	79,22
G5	120	1	45	876,648	1072,343	81,75
G6	120	1	60	661,283	846,652	78,11
G7	120	1,5	30	872,523	1105,792	78,90

G8	120	1,5	45	673,243	1090,578	61,73
G9	120	1,5	60	883,817	1080,876	81,77
G10	135	0,5	30	680,015	1076,005	63,20
G11	135	0,5	45	871,171	1089,417	79,97
G12	135	0,5	60	663,282	1105,564	59,99
G13	135	1	30	868,951	1092,792	79,52
G14	135	1	45	678,694	1093,381	62,07
G15	135	1	60	673,550	1091,217	61,72
G16	135	1,5	30	676,471	860,038	78,66
G17	135	1,5	45	875,668	1093,758	80,06
G18	135	1,5	60	675,191	841,153	80,27
G19	150	0,5	30	873,260	1094,584	79,78
G20	150	0,5	45	671,915	847,171	79,31
G21	150	0,5	60	861,509	1078,952	79,85
G22	150	1	30	676,292	867,622	77,95
G23	150	1	45	846,888	1111,583	76,19
G24	150	1	60	673,263	870,584	77,33
G25	150	1,5	30	858,446	1077,142	79,70
G26	150	1,5	45	677,557	851,384	79,58
G27	150	1,5	60	859,312	1095,994	78,40

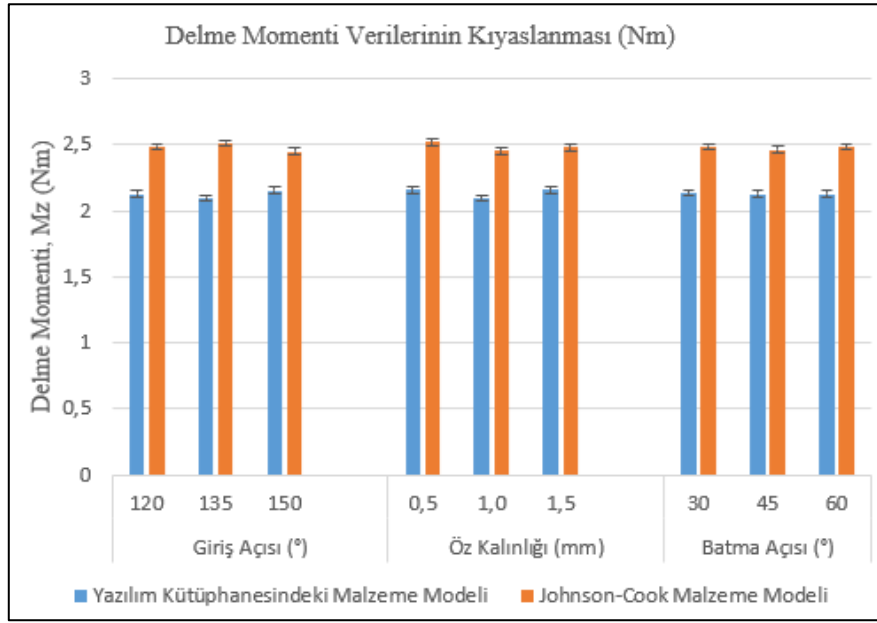
3.2. Delme Momenti (Tork) Verilerinin Analizi (Analysis of Drilling Torque Data)

İtme kuvvetinde olduğu gibi, delme momentinde de Johnson-Cook modeli, standart kütüphane verilerine göre istikrarlı bir şekilde daha yüksek (ortalama %15-20) sonuçlar vermiştir (Şekil 7). Bu durum, J-C malzeme modelinin AISI 4140 malzemesinin deformasyon sertleşmesini moment hesaplamalarında daha baskın bir değişken olarak ele aldığını göstermektedir.

Giriş açısı 120°'den 135°'ye çıktığında moment değerlerinde hafif bir azalma eğilimi görülürken, 150°'de tekrar bir artış gözlemlenmiştir. Standart modelde bu değişimler daha lineer iken, J-C modeli 135° giriş açısında malzemenin talaş kaldırma direncini daha düşük tahmin etmiştir. Moment değerlerinin öz kalınlığı değişiminden itme kuvvetine göre daha az etkilendiği görülmektedir. Ancak 1,5 mm öz kalınlığında J-C modelinin verdiği yüksek değerler, malzemenin daha kalın öz yapısı nedeniyle maruz kaldığı plastik deformasyon direncini karakterize etmektedir. Batma açısı

değişimlerinde J-C modelinin 45° seviyesindeki belirgin moment düşüşü dikkat çekicidir. Bu durum, matkap ucundaki gerilme dağılımının belirli bir açıda (45°) talaş tahliyesini kolaylaştırdığı ve sürtünme kaynaklı momenti düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir.

J-C modelinde elde edilen moment verilerinin kütüphane verilerine göre yer yer daha kararlı bir seyir izlemesi, modelin AISI 4140 için tanımlanan yüksek gerinim hızı hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Wolf ve ark., delme simülasyonlarında tork değerlerinin tahmininde malzeme modeli denklemlerinin %11 gibi düşük bir sapma ile deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu vurgulamışlardır [33]. Yıldız ve ark., delme momentinin ana kesici kenar üzerindeki yük dağılımıyla ilişkili olduğunu ve sonlu elemanlar analizinin bu dağılımı öngörmedeki başarısını raporlamışlardır [16]. Özellikle matkap uç geometrisindeki As ve An değişimlerinin, kesici kenarın iş parçasına dalma direncini değiştirerek momentini %15-20 oranında etkilediği görülmüştür.



Şekil 7. Delme momenti verilerine göre; J-C malzeme modeli ve Yazılım kütüphanesi tam faktöriyel etki grafikleri (According to the drilling moment data; J-C material model and Software library full factorial effect graphs)

Tablo 9’da sunulan delme momenti (tork) sonuçları incelendiğinde, itme kuvveti (Fz) sonuçlarına benzer bir eğilimle, Johnson-Cook malzeme modelinin, AdvantEdge yazılım kütüphanesindeki standart modele kıyasla daha yüksek tork değerleri ürettiği görülmektedir. Standart kütüphane verileri ile elde edilen tork değerleri 1,99 Nm ile 2,28 Nm aralığında değişirken, literatür destekli J-C modelinde bu değerler 2,26 Nm ile 2,59 Nm bandına yükselmiştir.

Tablo 9’daki yakınsama oranları incelendiğinde, itme kuvveti analizlerinde (Tablo 8) %60 seviyelerinde kalan G8, G10, G12, G14 ve G15 kodlu "sorunlu" simülasyonların, tork analizlerinde %77 seviyelerine kadar iyileşme gösterdiği; diğer geometrilerin ise %88 civarında yakınsadığı görülmektedir. İtme kuvveti ile tork arasındaki bu yakınsama farkı, delme mekaniğinin doğası ile

açıklanabilir. Oezkaya ve Biermann, simülasyonlardaki "ağ düğüm hatalarının" (mesh node errors) genellikle matkap ucunun merkezindeki aşırı deformasyon bölgesinde yoğunlaştığını belirtmiştir [32]. İtme kuvveti (Fz), doğrudan bu merkezdeki ezme bölgesinden etkilenirken; tork (Mz), kuvvetin yarıçap ile çarpımı ($F \times r$) olduğu için, matkap merkezindeki ağ bozulmalarından sayısal olarak daha az etkilenmektedir.

Bununla birlikte, G8, G10, G12 gibi 135° uç açısına sahip geometrilerde yakınsamanın %100’e ulaşamayıp %77 bandında kalması, Yıldız ve arkadaşlarının işaret ettiği gibi, kesici kenar boyunca oluşan eleman bozulmalarının ve yeniden ağ örme (remeshing) zorluklarının, tork hesaplamasında da belirli bir süreksizliğe neden olduğunu göstermektedir [16].

Tablo 9. Delme momenti sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of drilling moment results)

Matkap kodu	Giriş açısı (°)	Öz kalınlığı (mm)	Batma açısı (°)	AdvantEdge malzeme kütüphanesi Mz (Nm)	J-C malzeme modeli Mz (Nm)	Yüzde yakınsama (%)
G1	120	0,5	30	2,287	2,584	88,49
G2	120	0,5	45	2,009	2,303	87,24
G3	120	0,5	60	2,287	2,593	88,20
G4	120	1	30	1,994	2,285	87,27
G5	120	1	45	2,281	2,578	88,47
G6	120	1	60	2,004	2,268	88,39

G7	120	1,5	30	2,287	2,596	88,12
G8	120	1,5	45	2,007	2,582	77,71
G9	120	1,5	60	2,280	2,580	88,36
G10	135	0,5	30	2,003	2,578	77,68
G11	135	0,5	45	2,281	2,577	88,54
G12	135	0,5	60	2,000	2,593	77,14
G13	135	1	30	2,283	2,576	88,61
G14	135	1	45	2,006	2,583	77,66
G15	135	1	60	2,003	2,587	77,41
G16	135	1,5	30	1,992	2,285	87,17
G17	135	1,5	45	2,287	2,591	88,27
G18	135	1,5	60	2,010	2,268	88,65
G19	150	0,5	30	2,279	2,583	88,23
G20	150	0,5	45	2,003	2,278	87,93
G21	150	0,5	60	2,271	2,575	88,18
G22	150	1	30	2,008	2,297	87,45
G23	150	1	45	2,270	2,582	87,88
G24	150	1	60	2,000	2,308	86,65
G25	150	1,5	30	2,276	2,570	88,58
G26	150	1,5	45	2,006	2,273	88,27
G27	150	1,5	60	2,278	2,577	88,41

3.3. Sıcaklık verilerinin analizi (Analysis of temperature data)

Şekil 8’de sunulan termal analiz sonuçları incelendiğinde, J-C malzeme modelinin, tüm geometrik parametrelerde (giriş açısı, öz kalınlığı ve batma açısı) AdvantEdge yazılım kütüphanesindeki standart modele kıyasla belirgin şekilde daha yüksek sıcaklık değerleri tahmin ettiği görülmektedir. Standart model ile elde edilen sıcaklıklar ortalama 470–485°C bandında seyrederken, özelleştirilmiş J-C modeli ile bu değerler 560–580°C aralığına yükselmiştir. Bu durum, delme işlemi sırasında açığa çıkan ısının modellenmesinde kullanılan bünye denklemlerinin (constitutive equations) kritik rolünü göstermektedir.

Literatürde Svensson ve ark., J-C modelinin metal kesme simülasyonlarında akış gerilmesini; plastik şekil değiştirme, gerinim hızı ve termal yumuşama terimlerinin çarpımı ile tanımladığını ve bu parametrelerin sıcaklık tahmini üzerindeki doğrudan etkisini vurgulamışlardır [17]. Grafikte J-C modelinin daha yüksek sıcaklıklar üretmesi, bu

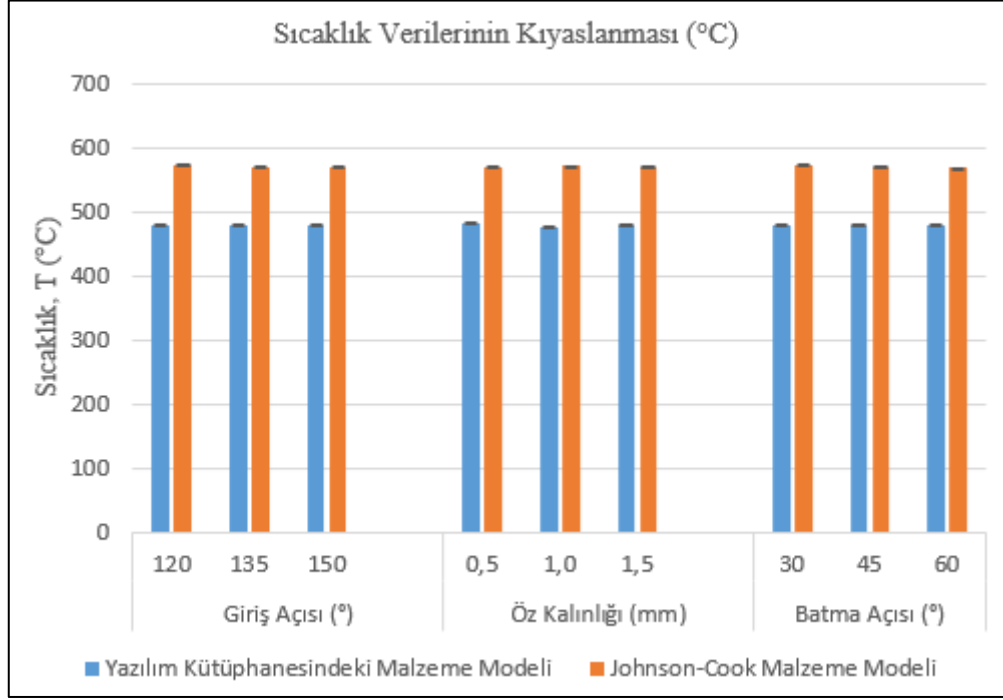
modelin AISI 4140 çeliğinin yüksek gerinim oranlarındaki sertleşme davranışını ve deformasyon enerjisinin ısıya dönüşümünü standart kütüphane verilerine göre daha hassas bir şekilde simüle ettiğini göstermektedir.

Geometrik parametrelerin sıcaklık üzerindeki etkisi incelendiğinde, öz kalınlığındaki artışın ve giriş açısındaki değişimlerin sıcaklık dağılımını etkilediği görülmektedir. Uçak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, benzer delme koşullarında (kesme hızı ve ilerleme) oluşan sıcaklıkların 500°C ve üzeri seviyelere ulaşabileceği hem deneysel hem de simülasyon (DEFORM-3D) verileriyle doğrulanmıştır [34]. Ayrıca Kolesnyk ve ark., delme operasyonlarında sürtünme ve plastik deformasyon kaynaklı ısının, takım-talaş arayüzünde 400–625°C aralığına çıkabileceğini rapor etmişlerdir [35].

Elde edilen bulgulara göre, Standart modelin ürettiği sıcaklık değerleri (470–485°C), Kolesnyk ve arkadaşlarının belirttiği genel aralık (400–625°C) içerisinde kalsa da, AISI 4140 çeliği özelindeki literatür verilerine kıyasla alt sınırdaki yer

almaktadır. Svensson ve arkadaşları, AISI 4140 çeliğinin delinmesinde kesme bölgesi sıcaklıklarının 750°C ve üzerine çıkabildiğini rapor etmişlerdir [17]. Çalışmamızda kullanılan J-C modeli, Standart modele kıyasla daha yüksek sıcaklıklar (560–580°C) tahmin etmiştir. J-C modelinin kuvvet ve tork değerlerini artırarak (Bkz. Şekil 5 ve Şekil 6) mekanik enerji girdisini daha

doğru modellediği dikkate alındığında, sıcaklık değerlerindeki bu artış, plastik deformasyon enerjisinin ısıya dönüşümü ilkesiyle termodinamik bir tutarlılık göstermektedir. Bu nedenle, 575°C bandındaki J-C sonuçlarının, AISI 4140'ın yüksek mukavemetli yapısının yarattığı termal yükleri temsil etmede Standart modele göre daha güvenilir olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 8. Sıcaklık değerleri sonucunda; J-C malzeme modeli ve Yazılım kütüphanesi tam faktöriyel etki grafikleri (As a result of the temperature values; J-C material model and Software library full factorial effect graphs)

Tablo 10'da sunulan sıcaklık analiz sonuçları incelendiğinde, farklı matkap geometrileri için Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli ile elde edilen maksimum kesme sıcaklıklarının (ortalama 570°C - 580°C), AdvantEdge kütüphanesindeki standart model verilerine (ortalama 470°C - 485°C) kıyasla yaklaşık 100°C daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, kuvvet ve tork analizlerinde (Tablo 8 ve Tablo 9) gözlemlenen eğilimlerle tam bir tutarlılık göstermektedir.

Metal kesme teorisine göre, kesme işlemi sırasında harcanan mekanik enerjinin %90'ından fazlası ısıya dönüşmektedir. Bu ısının ana kaynakları, birincil kesme bölgesindeki plastik deformasyon ve takım-talaş arayüzündeki sürtünmedir. Andersson ve ark., AISI 4140 çeliğinin delinmesi üzerine yaptıkları ısıl modelleme çalışmalarında, iş parçası sıcaklıklarının mekanik yüklerle doğrudan ilişkili olduğunu ve plastik deformasyonun ısı üretimindeki baskın rolünü vurgulamışlardır [18].

Çalışmamızda J-C modelinin, standart modele göre daha yüksek itme kuvveti ve tork değerleri üretmesi

(Bkz. Tablo 8 ve 9), malzemenin deformasyona karşı daha yüksek direnç gösterdiğini kanıtlamaktadır. Dolayısıyla, J-C modelinde daha yüksek mekanik enerji harcanması, termodinamik yasaları gereği kesme bölgesinde daha yüksek bir ısı açığa çıkmasına ve sıcaklık değerlerinin 580°C seviyelerine yükselmesine neden olmuştur.

J-C malzeme modeli, malzemenin akış gerilmesini sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki (Eşitlik 4) termal yumuşama terimi ile modifiye eder:

$$\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

Burada, m katsayısı termal yumuşama üssüdür. Svensson ve ark., AISI 4140 için yaptıkları simülasyonlarda, doğru tanımlanmış J-C parametrelerinin (özellikle m ve A,B sabitlerinin), sıcaklık alanlarının ve buna bağlı oluşan termal distorsiyonların tahmininde kritik öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir [17]. Tablo 10'daki J-C sonuçlarının standart kütüphaneden daha yüksek çıkması, kullanılan özelleştirilmiş modelin, yüksek

sıcaklıklarda malzemenin mukavemetini koruma eğilimini daha hassas yansıttığını ve standart kütüphanenin öngördüğü "erken yumuşama" davranışını sergilemediğini göstermektedir. Uçak ve arkadaşları da benzer şekilde, Inconel gibi zor işlenen malzemelerin simülasyonunda, J-C model parametrelerinin sıcaklık dağılımı üzerindeki belirleyici etkisini doğrulamışlardır [34].

Tablo 10'daki yakınsama yüzdeleri incelendiğinde, tüm geometrilerde %81 ile %85 arasında istikrarlı bir çözüm sağlandığı görülmektedir. İtme kuvveti analizlerinde (Tablo 8) bazı geometrilerde (G8, G10 vb.) görülen düşük yakınsama (%60) sorununun aksine, sıcaklık analizlerinde yakınsamanın yüksek olması, termal analizin sayısal kararlılığının mekanik (kuvvet) çözümünden daha stabil olduğunu göstermektedir. Bu durum, Svensson ve

arkadaşlarının belirttiği gibi, sıcaklık alanının yerel ağ bozulmalarına (mesh distortion) mekanik gerilmeler kadar duyarlı olmaması ve ısının malzeme içinde difüzyon yoluyla daha homojen dağılması ile açıklanabilir [17].

Sonuç olarak, J-C malzeme modeli ile elde edilen 560°C-580°C aralığındaki sıcaklık değerleri, literatürde AISI 4140 işlenmesi sırasında gözlemlenen sıcaklık artışları ile uyumludur. Andersson vd. (2024) çalışmalarında, benzer koşullarda sıcaklıkların 750°C - 1000°C bandına kadar çıkabileceğini simüle etmişlerdir [18]. Bu bağlamda, çalışmamızdaki J-C modelinin ürettiği daha yüksek sıcaklık değerleri, standart kütüphane verilerine göre fiziksel gerçekliğe daha yakın bir tahmin sunmaktadır.

Tablo 10. Sıcaklık değerleri sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the results of temperature values)

Matkap kodu	Giriş açısı (°)	Öz kalınlığı (mm)	Batma açısı (°)	AdvantEdge malzeme kütüphanesi (°C)	J-C malzeme modeli (°C)	Yüzde yakınsama (%)
G1	120	0,5	30	486,79	580,14	83,91
G2	120	0,5	45	479,20	570,67	83,97
G3	120	0,5	60	488,79	572,51	85,38
G4	120	1	30	478,01	575,17	83,11
G5	120	1	45	483,69	564,11	85,74
G6	120	1	60	465,14	569,91	81,62
G7	120	1,5	30	481,50	573,79	83,92
G8	120	1,5	45	474,74	577,07	82,27
G9	120	1,5	60	486,44	567,34	85,74
G10	135	0,5	30	476,05	568,92	83,68
G11	135	0,5	45	485,95	569,97	85,26
G12	135	0,5	60	474,04	571,97	82,88
G13	135	1	30	487,69	572,07	85,25
G14	135	1	45	474,47	571,88	82,97
G15	135	1	60	474,45	570,50	83,16
G16	135	1,5	30	476,18	577,65	82,43
G17	135	1,5	45	483,23	576,76	83,78
G18	135	1,5	60	475,52	561,59	84,67
G19	150	0,5	30	485,25	570,57	85,05
G20	150	0,5	45	476,62	569,52	83,69
G21	150	0,5	60	481,77	562,41	85,66
G22	150	1	30	471,63	577,96	81,60

G23	150	1	45	480,92	570,86	84,25
G24	150	1	60	476,68	573,46	83,12
G25	150	1,5	30	481,12	564,82	85,18
G26	150	1,5	45	481,05	566,52	84,91
G27	150	1,5	60	479,42	571,73	83,85

3.4. Matkaplarda Oluşan Gerilmelerin İncelenmesi (Investigation of Stresses Formed In Drills)

Şekil 9'da, delme simülasyonları sonucunda matkaplar üzerinde oluşan Maksimum Asal Gerilme (σ_1 , çekme), Minimum Asal Gerilme (σ_3 , basma) ve Eşdeğer (Von-Mises, σ_e) gerilme dağılımları verilmiştir.

Elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, gerilmelerin özellikle ana kesme kenarları, matkap ucu ve zırh bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, Yıldız ve arkadaşlarının belirttiği üzere, delme işlemi sırasında matkap ucunun ve helisel kanalların en yüksek mekanik yüklere maruz kaldığı ve gerilme yığılmasının bu bölgelerde yoğunlaştığı tespitiyle örtüşmektedir [16]. Özellikle matkap öz kalınlığı bölgesindeki gerilme yoğunlaşması, Abele ve Fujara tarafından vurgulanan, bu bölgedeki malzemenin kesilmekten ziyade ezilerek deforme edilmesi prensibiyle açıklanabilir [15].

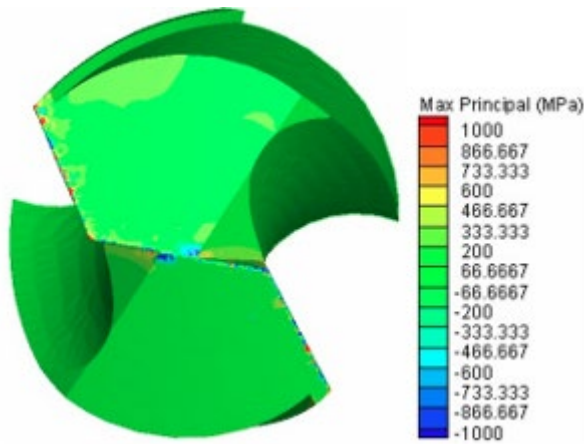
Malzeme modelleri kıyaslandığında; J-C modeli ile elde edilen maksimum gerilme değerlerinin, yazılım kütüphanesindeki standart modele kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Önceki bölümlerde (Bkz. Kuvvet ve Delme Momenti

Analizi) J-C modelinin AISI 4140 çeliğinin deformasyon sertleşmesi davranışını daha hassas yansıttığı belirlenmiştir. Bayraktar ve ark., takım-talaş arayüzündeki temasın kesme kenarı civarında yüksek gerilmeler oluşturduğunu ve bu gerilmelerin kesme kuvvetleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir [3]. Dolayısıyla, J-C modelinde gözlemlenen yüksek gerilme değerleri, malzemenin gerçekçi kesme direncinin matkap üzerine binen yük olarak yansımadır. Bu bağlamda optimum geometri seçimi değerlendirildiğinde;

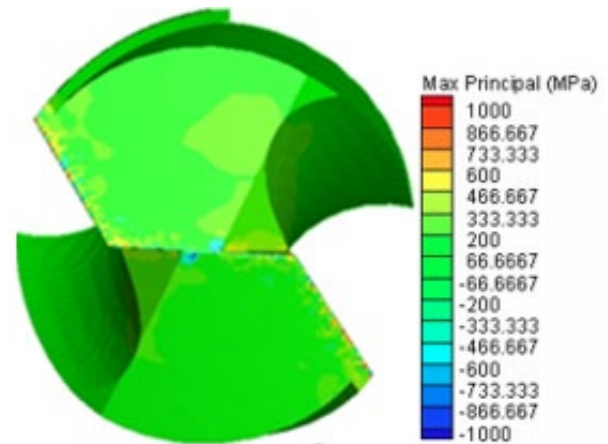
- Standart Kütüphane Modeli ile yapılan analizlerde, daha düşük gerilme ve kuvvet tahminleri nedeniyle G15 kodlu matkap optimum geometri olarak belirlenmiştir (Şekil 9b, 9d, 9f).

- J-C Malzeme Modeli ile yapılan ve literatürle daha uyumlu sonuçlar veren analizlerde ise, malzemenin sertleşme davranışı dikkate alındığında G24 kodlu matkap optimum geometri olarak öne çıkmıştır (Şekil 9a, 9c, 9e).

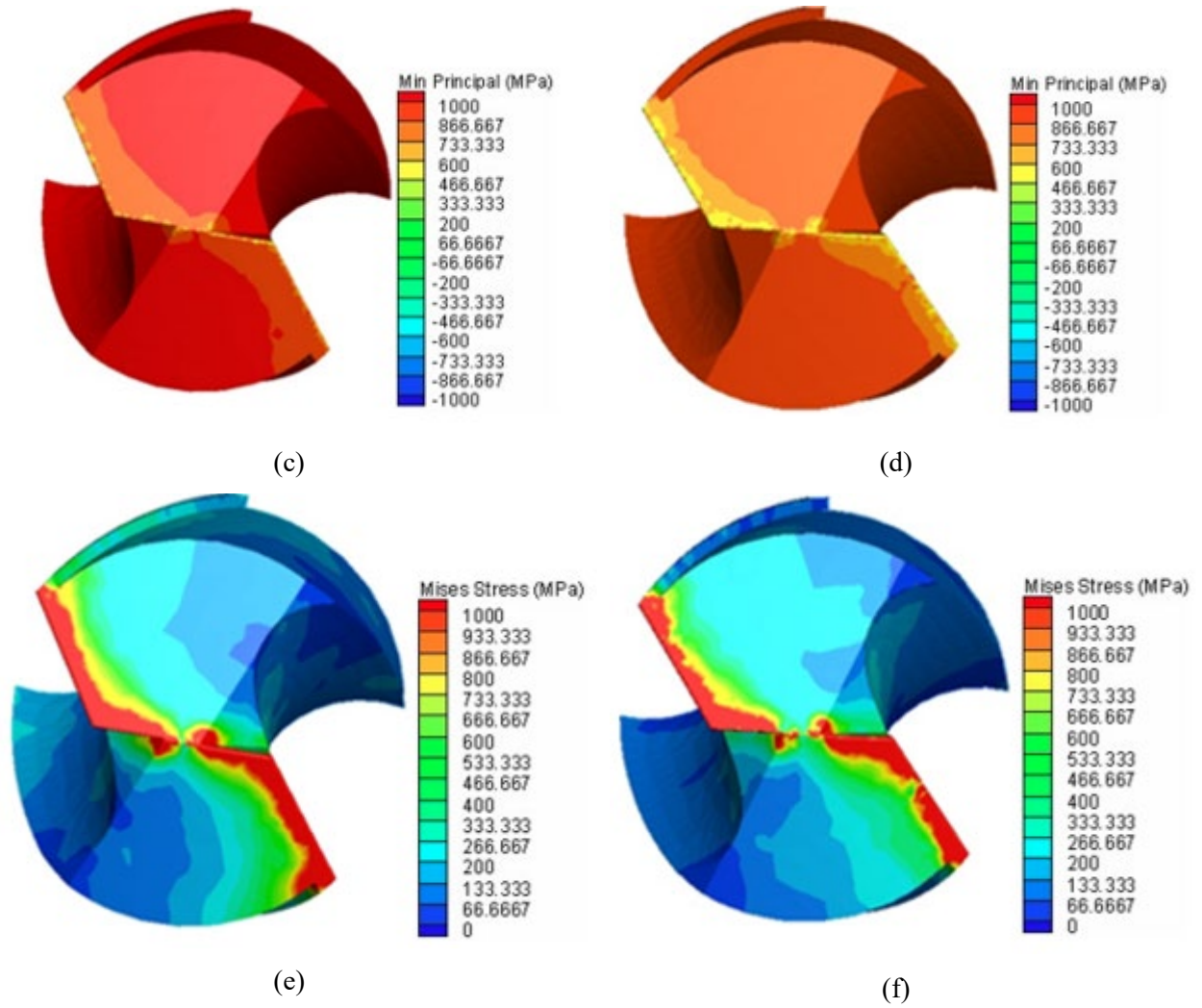
Bu nedenle, AISI 4140 gibi yüksek mukavemetli çeliklerin delinmesinde, takım ömrü ve dayanım açısından G24 geometrisinin referans alınmasının daha güvenli bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.



(a)



(b)



Şekil 9. Matkaplarda oluşan gerilmeler; (a) G24 kodlu matkap üzerinde oluşan maksimum asal gerilmeler (b) G15 kodlu matkap üzerinde oluşan maksimum asal gerilmeler (c) G24 kodlu matkap üzerinde oluşan minimum asal gerilmeler (d) G15 kodlu matkap üzerinde oluşan minimum asal gerilmeler (e) G24 kodlu matkap üzerinde oluşan eşdeğer gerilmeler (f) G15 kodlu matkap üzerinde oluşan eşdeğer gerilmeler (Stresses generated in drills; (a) Maximum principal stresses generated on the G24-coded drill (b) Maximum principal stresses generated on the G15-coded drill (c) Minimum principal stresses generated on the G24-coded drill (d) Minimum principal stresses on the G15-coded drill bit (e) Equivalent stresses on the G24-coded drill bit (f) Equivalent stresses on the G15-coded drill bit)

3.5. Delme Simülasyonları Sonucunda Oluşan Talaş Şekillerinin İncelenmesi (Investigation Of Chip Formation As A Result Of Drilling Simulations)

Delme simülasyonları sonucunda; Johnson-Cook malzeme modeli ile “G24”, yazılım kütüphanesi standart modeli ile “G15” kodlu matkaplar optimum geometri olarak belirlenmiştir. Bu iki geometri için talaş oluşum mekanizmasını ve akışını incelemek amacıyla simülasyonlar 3 tam tur (1080°) boyunca sürdürülmüştür. Şekil 10’da, her iki matkap için 360°, 720° ve 1080° dönme açılarında elde edilen talaş formları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

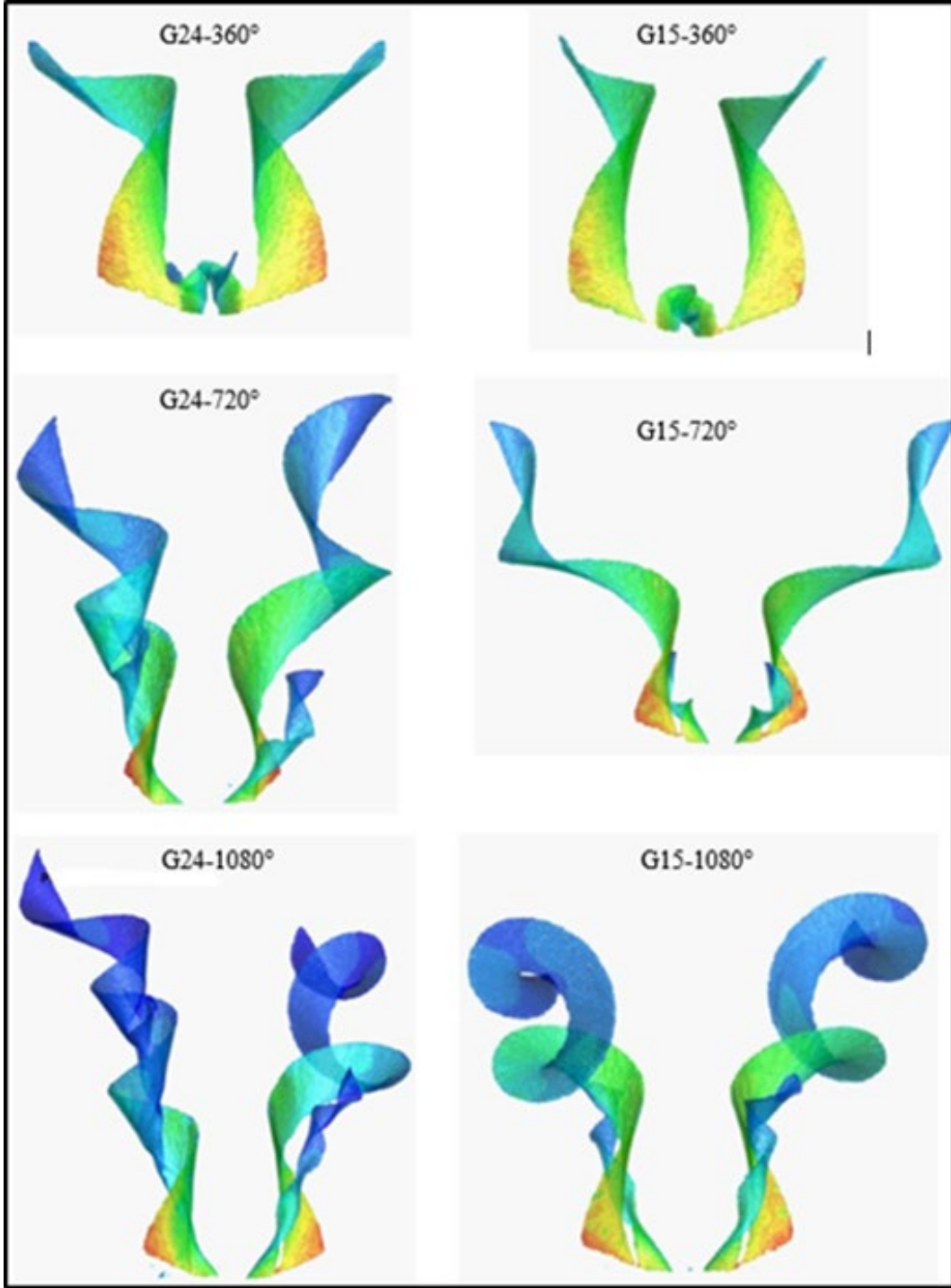
Görseller incelendiğinde, her iki modelde de sürekli ve spiral formda talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Svensson ve ark., AISI 4140 çeliğinin delinmesinde oluşan talaşların tipik olarak spiral formda olduğunu ve kesici kenar boyunca sürekli bir akış

sergilediğini belirtmişlerdir [17]. Şekil 10’daki 360°’den 1080°’ye kadar olan süreçte talaş formunun geometrik kararlılığını koruması, simülasyonun kararlı duruma ulaştığını ve ağ yapısının (mesh) plastik deformasyonu başarıyla modellediğini göstermektedir.

G24 ve G15 matkapları arasında talaş morfolojisi açısından belirgin bir görsel fark oluşmaması, her iki geometrinin de talaş tahliyesi açısından yeterli helis kanalı hacmine sahip olduğunu işaret etmektedir. Ancak, önceki bölümlerde (Bkz. Sıcaklık Analizi) J-C modelinin daha yüksek sıcaklıklar (580°C) tahmin ettiği belirlenmişti. Giasin ve ark., artan kesme sıcaklıklarının iş parçasının sünekliğini artırarak talaşın kırılmadan uzamasına ve sürekli form almasına neden olduğunu rapor etmişlerdir [36]. Bu bağlamda, G24

ile elde edilen sürekli talaş formunun, J-C modelinin öngördüğü yüksek termal yumuşama ve malzeme

sünekliği ile fiziksel olarak uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 10. G24 ve G15 kodlu matkaplar 360°, 720° ve 1080° döndürülerek yapılan delme simülasyonları sonucunda oluşan talaş şekilleri (Investigation of chip formation as a result of drilling simulations performed by rotating G24 and G15 coded drills 360°, 720° and 1080°)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinin delinmesi işleminde 27 farklı matkap uç geometrisinin performansı, standart yazılım kütüphanesi ve literatür destekli Johnson-Cook (J-C) malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle

analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- **Model Karşılaştırması:** J-C malzeme modeli ile elde edilen itme kuvveti (F_z), delme momenti (M_z) ve sıcaklık değerleri, standart kütüphane modeline göre sistematik olarak daha yüksek çıkmıştır.

Svensson ve arkadaşları tarafından belirtildiği üzere, standart modellerin AISI 4140 gibi malzemelerde kuvvetleri eksik tahmin etme eğiliminde olduğu dikkate alındığında, J-C modelinin ürettiği daha yüksek değerlerin termodinamik açıdan fiziksel gerçekliğe daha yakın olduğu değerlendirilmektedir [17].

• **Yakınsama ve Ağ Yapısı:** Analizlerin büyük çoğunluğunda %80 ve üzeri yakınsama sağlanmıştır. Ancak özellikle 135° uç açısına sahip geometrilerde (G8, G10, G12) standart model ile yakınsama oranlarının %60 civarında kaldığı görülmüştür. Bu durum, Oezkaya ve Biermann ile Yıldız ve arkadaşlarının işaret ettiği gibi, matkap ucundaki ezme bölgesinde oluşan aşırı plastik deformasyonun, ağ yapısında 'düğüm hatalarına' (mesh node errors) ve eleman bozulmalarına (element distortion) yol açmasından kaynaklanmaktadır [16, 32]. J-C modeli, malzemenin sertleşme davranışını daha iyi tanımlayarak bu bölgelerde ağ yapısının stabilitesini artırmış ve daha tutarlı sonuçlar üretmiştir.

• **Sıcaklık ve Talaş Oluşumu:** Standart model ortalama 470–485°C sıcaklık tahmin ederken, J-C modeli 560–580°C aralığında sonuçlar vermiştir. J-C modelindeki bu artış, artan mekanik enerji girdisinin ısıya dönüşümü prensibiyle uyumludur. Her iki modelde de sürekli ve spiral talaş formları elde edilmiş olup, bu durum simülasyonların kararlı kesme koşullarına ulaştığını göstermektedir.

• **Optimum Geometri:** Tam faktöriyel etki grafiklerine göre; standart model G15, J-C modeli ise G24 kodlu matkabı optimum geometri olarak işaret etmiştir. J-C modelinin AISI 4140'ın deformasyon davranışını ve termal yüklerini daha hassas temsil ettiği göz önüne alındığında, G24 geometrisinin takım ömrü ve performans açısından daha güvenilir bir referans noktası olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, delme simülasyonlarında sadece yazılım kütüphanelerine bağlı kalmak yerine, literatürden doğrulanmış malzeme sabitlerinin (J-C) kullanılması, özellikle karmaşık matkap geometrilerinde (geniş uç açıları, öz kalınlığı, batma açısı vb.) analiz güvenilirliğini artırmaktadır. Elde edilen bu veriler, deneysel çalışmalar öncesinde süreç parametrelerinin optimizasyonu için güçlü bir öngörü sağlamaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu çalışma, 30 Ekim-2 Kasım 2025 tarihleri arasında gerçekleşen 13. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda (UTIS 2025) özet tebliğ olarak sunulmuştur.

This work was presented as an abstract at the 13th International Symposium on Machining (UTIS 2025) held between October 30 and November 2, 2025.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Tuncer DEMİREL: Literatür taraması ve Simülasyon çalışmalarını yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He has done literature review and Simulation studies, analyzed the results and completed the writing process of the article.

Kutay AYDIN: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He also analyzed the results and carried out writing the article.

Gökhan DELİORMAN: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He also analyzed the results and carried out writing the article.

Abdullah KURT: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He also analyzed the results and carried out writing the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] B. S. Kumar, N. Baskar, and K. Rajaguru, "Drilling operation: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 926–933, 2020.
- [2] D. Patel and R. Verma, "Analysis of drilling tool life-a review," *International journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 4, no. 1, p. 523, 2015.
- [3] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş, and Y. Turgut, "Delik delme prosesi: bir araştırma," *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 2, 2017.

- [4] D. Kim and M. Ramulu, "Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks," *Composite structures*, vol. 63, no. 1, pp. 101–114, 2004.
- [5] E. Trent, "metal cutting 2nd edition Butterworth's & Co. London, UK, limited," ISBN 0-408-34-38, 1984.
- [6] S. Fuji, M. DeVries, and S. Wu, "Analysis of the chisel edge and the effect of the d-theta relationship on drill point geometry, J," *Engng Ind*, vol. 93, pp. 1093–1105, 1971.
- [7] L. Shu et al., "Study on dedicated drill bit design for carbon fiber reinforced polymer drilling with improved cutting mechanism," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 142, p. 106259, 2021.
- [8] C. Kahng, "Performance Testing of Twist Drills on AISI 4140 Alloy Steel," 1979.
- [9] N. Baak, F. Schaldach, J. Nickel, D. Biermann, and F. Walther, "Barkhausen noise assessment of the surface conditions due to deep hole drilling and their influence on the fatigue behaviour of AISI 4140," *Metals*, vol. 8, no. 9, p. 720, 2018.
- [10] J. Nickel, N. Baak, D. Biermann, and F. Walther, "Influence of the deep hole drilling process and sulphur content on the fatigue strength of AISI 4140 steel components," *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 209–214, 2018.
- [11] G. Meral, M. Sarıkaya, M. Mia, H. Dilipak, and U. Şeker, "Optimization of hole quality produced by novel drill geometries using the Taguchi S/N approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 1, pp. 339–355, 2019.
- [12] S. Açıy, M. Kolaç, and O. Atak, "AISI 4140 Çeliğinin delinmesinde kesme kenar radyüsü ve kesme parametrelerinin optimizasyonu," *Manufacturing Technologies and Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 33–40, 2020.
- [13] M. Yavuz, H. Gökçe, İ. Çiftçi, H. Gökçe, Ç. Yavaş, and U. Şeker, "Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 9, pp. 4623–4633, 2020.
- [14] Y. Çavuş, Ş. Katmer, İ. Tekaut, S. Kurt, H. Gökçe, and U. Şeker, "AISI 4140 Islah Çeliğinin Delinmesinde Yarık Talaş Açısının Etkisinin Deneysel ve Teorik Araştırılması," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 594–605, 2022.
- [15] E. Abele and M. Fujara, "Simulation-based twist drill design and geometry optimization," *CIRP annals*, vol. 59, no. 1, pp. 145–150, 2010.
- [16] A. Yıldız, A. Kurt, and S. Yağmur, "Finite element simulation of drilling operation and theoretical analysis of drill stresses with the deform-3D," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 104, p. 102153, 2020.
- [17] D. Svensson, T. Andersson, and A. A. Lassila, "Coupled Eulerian-Lagrangian Simulation of Indexable Drilling," 2021.
- [18] T. Andersson, D. Svensson, and A. Andersson Lassila, "Modelling and simulation of heat flow in indexable insert drilling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 9, pp. 5177–5192, 2024.
- [19] F. Yusubov, "Corrosion and wear behavior of AISI 4140 brake discs in simulated drilling environments," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, no. 1, p. 122, 2025.
- [20] Z. Krivokapić, R. Vučurević, D. Kramar, and J. Šaković Jovanović, "Modelling surface roughness in the function of torque when drilling," *Metals*, vol. 10, no. 3, p. 337, 2020.
- [21] Ö. ŞAHİN and E. KALUÇ, "Experimental Investigation of Effects of Feed Rate and Cutting Speed on Surface Roughness and Cutting Tool Wear in Drilling of AISI 4140 Steel Workpieces Hardened up to 30 HRC using Solid Carbide Drills," *Research square*, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs>, vol. 3.
- [22] A. De Bartolomeis, S. T. Newman, I. Jawahir, D. Biermann, and A. Shokrani, "Future research directions in the machining of Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 297, p. 117260, 2021.
- [23] *AdvantEdge User's Manuel 7.1*, 2015.
- [24] R. D. Han and J. Wu, "Finite element simulation of drilling based on third wave systems AdvantEdge," *Key Engineering Materials*, vol. 431, pp. 229–232, 2010.
- [25] G. R. Johnson, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," in *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 1983, 1983.
- [26] M. Lotfi, S. Amini, and M. Aghaei, "Tool wear modeling in rotary turning modified by ultrasonic vibration," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 87, pp. 226–238, 2018.
- [27] A. Haglund, H. Kishawy, and R. Rogers, "An exploration of friction models for the chip–tool interface using an Arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element model," *Wear*, vol. 265, no. 3-4, pp. 452–460, 2008.
- [28] A. Tzotzis, C. García-Hernández, J.-L. Huertas-Talón, and P. Kyratsis, "Influence of the nose radius on the machining forces induced during AISI-4140 hard turning: A CAD-based and 3D FEM approach," *Micromachines*, vol. 11, no. 9, p. 798, 2020.

- [29] E. Öztürk, "FEM and statistical-based assessment of AISI-4140 dry hard turning using micro-textured insert," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 81, pp. 290–300, 2022.
- [30] K. Aydın and U. Şeker, "AISI 4140 Çelik Alaşımın Sert Tornalanmasındaki Karbon Emisyon Miktarının Sonlu Elemanlar ve Regresyon Yöntemleri ile Analizi," *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, no. UTIS 2024, pp. 1–12, 2025.
- [31] E. Satoshi, "Effects of twist drill point geometry on torque and thrust," *Sci Rep Fac Educ Gifu Unive (Nat Sci)*, vol. 36, pp. 165–174, 2012.
- [32] E. Oezkaya and D. Biermann, "Development of a geometrical torque prediction method (GTPM) to automatically determine the relative torque for different tapping tools and diameters," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 1, pp. 1465–1479, 2018.
- [33] T. Wolf, M. Fast, J. Saelzer, G. Brock, D. Biermann, and S. Turek, "Modeling and validation of a FEM chip formation simulation to expand the numerical work on discontinuous drilling of Inconel 718," *Procedia CIRP*, vol. 117, pp. 32–37, 2023.
- [34] N. Uçak, A. Çiçek, E. Oezkaya, and K. Aslantas, "Finite element simulations of cutting force, torque, and temperature in drilling of Inconel 718," *Procedia CIRP*, vol. 82, pp. 47–52, 2019.
- [35] V. Kolesnyk et al., "Experimental study of drilling temperature, geometrical errors and thermal expansion of drill on hole accuracy when drilling CFRP/Ti alloy stacks," *Materials*, vol. 13, no. 14, p. 3232, 2020.
- [36] K. Giasin, A. Hodzic, V. Phadnis, and S. Ayvar-Soberanis, "Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 5, pp. 2041–2061, 2016.