



ÇOK NOKTALI DERİN ÇEKME PROSESİNDE FARKLI PİM RADIUSLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kaan Emre ENGİN^{1*}

¹Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 02040, Adıyaman, Türkiye

Özet: Derin çekme prosesi, metal levha şekillendirme endüstrisinde en çok tercih edilen proseslerden bir tanesidir. Özellikle seri üretim söz konusu olduğunda kap formundaki iş parçalarının düşük maliyetlerle üretilmesi mümkündür. Ancak, aynı durum seri üretim dışında farklı boyutlara sahip ürünlerin imal edilmesi esnasında geçerli olmayıp, kalıp yapım maliyetlerinden kaynaklı olarak prosesin ekonomikliğini büyük ölçüde kaybetmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu dezavantajı gidermek amacıyla daha yeni yaklaşımların ve metodların geliştirilmesi gerekmektedir. Çok noktali derin çekme prosesi standart kalıp elemanları yerine yüksekliği ayarlanabilir pimler kullanılması vasıtasıyla farklı boyutlarda veya yüksekliklerde derin çekme işleminin yapılmasına müsaade eden bir yöntemdir. Ancak prosesin bir özelliği olan pim kullanımının etkilerinin araştırılması da önemlidir. Bu çalışmada 87 mm uzunluğunda, 12 mm çapa sahip pimlerden oluşan çok noktali derin çekme kalıbında farklı pim uç radyuslarının (1 mm, 3 mm, 6 mm) proses üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk önce 6 mm radyusa sahip pimlerden oluşan bir kalıp seti imal edilmiş ve 0,75 mm kalınlığa sahip AISI Al 3003 HX6 alüminyum alaşım üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı koşullar altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler ve deneylerden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bulgular arasındaki tutarlılık sağlandıktan sonra çalışmanın 1 mm ve 3 mm radyusa sahip pimlerin etkisinin incelenmesini içeren aşamaları sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilerek, analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak pim uç radyuslarının değerlerinin azaldıkça, iş parçası ile temas eden yüzeyin artmasına bağlı olarak gerekli yük değerinin arttığı ve iş parçasının daha düşük bir çekme derinliğinde yırtıldığı saptanmıştır. En iyi sonuçların 6 mm radyusa sahip pim kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Çok noktali şekillendirme, Derin çekme, Çok noktali derin çekme, Pim çapı, AISI Al 3003


Investigation of the Effect of Different Pin Radius in the Multi-Point Deep Drawing Process

Abstract: The deep drawing process is one of the most preferred processes in the sheet metal forming industry. Especially when it comes to mass production, it is possible to produce workpieces in the form of containers at low costs. However, the same situation is not valid during the production of products with different dimensions except for mass production, resulting in the process losing its economy to a large extent due to die manufacturing costs. In order to overcome this disadvantage, newer approaches and methods need to be developed. The multi-point deep drawing process is a method that allows deep drawing in different sizes or heights by using height-adjustable pins instead of standard die elements. However, it is also important to investigate the effects of the use of pins, which is a feature of the process. In this study, the effects of different pin end radii (1 mm, 3 mm, 6 mm) on the process were investigated in a multi-point deep drawing die consisting of pins with a length of 87 mm and a diameter of 12 mm. For this purpose, a die set consisting of pins with a radius of 6 mm was first manufactured and experiments were carried out on AISI Al 3003 HX6 aluminum alloy with a thickness of 0.75 mm. Then, the values obtained as a result of the simulations using the finite element method under the same conditions and the values obtained from the experiments were compared. After the consistency between the findings, the stages of the study including the examination of the effect of the pins with 1 mm and 3 mm radius were simulated by the finite element method and analyzes were carried out. As a result, it has been determined that as the values of the pin end radii decrease, the required load value increases due to the increase in the contact surface with the workpiece, and the workpiece ruptures at a lower drawing depth. It has been observed that the best results are obtained when using pins with a radius of 6 mm.

Keywords: Multi-point forming, Deep drawing, Multi-point deep drawing, Pin diameter, AISI Al 3003

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 02040, Adıyaman, Türkiye

E mail: kengin@adiyaman.edu.tr (K.E. ENGİN)

Kaan Emre Engin  <https://orcid.org/0000-0002-6439-7700>

Gönderi: 6 Eylül 2023

Kabul: 1 Ekim 2023

Yayınlanma: 15 Ekim 2023

Received: September 23, 2023

Accepted: October 1, 2023

Published: October 15, 2023

Cite as: Engin KE. 2023. Investigation of the Effect of Different Pin Radius in the Multi-Point Deep Drawing Process. BSE Eng Sci, 6(4): 613-623.

1. Giriş

Derin çekme prosesi, levha halindeki iş parçasının bir kalıp seti vasıtasıyla üç boyutlu derin bir kap formuna getirildiği yöntem olarak tanımlanabilir. Belirli bir geometriye sahip zımba, levhayı alt kalıp boşluğuna bastırarak, levhanın kalıp iç duvarına sıvanmasını ve bu

şekilde son halini almasını sağlar. Çeşitli parçaların yüksek kalitede ve hızlı olarak üretilebilmesi aynı zamanda da düşük maliyetlere sahip olması nedeniyle bu yöntem yaygın bir kullanıma sahiptir (Beglarzadeh ve Davoodi, 2016). Ancak, geleneksel metal levha şekillendirme yöntemlerin karşı karşıya oldukları en büyük sorunlardan bir tanesi kalıp sisteminin farklı



boyut ya da şekildeki parçaların üretimine göre ayarlanamaması ve ekonomikliğin ancak yüksek adetlerde üretim veya seri üretim söz konusu olduğunda sağlanabilmesidir (Zareh-Desari ve ark. 2017). Çünkü, farklı şekil ya da boyuttaki kalıp setlerinin üretilmesi ekstra maliyet gerektirmektedir ve küçük miktarda yapılacak üretimler açısından ekonomikliğin sağlanabilmesi zorlaşmaktadır. Bu dezavantajlı durum derin çekme prosesi içinde geçerlidir. Yeni yöntemlerin derin çekme prosesine uygulanması vasıtasıyla bu sorunun giderilmesi önem arz etmektedir.

Çok noktalı şekillendirme prosesi belirtilen dezavantajlı durumları giderebilecek bir yöntem olarak kendini göstermektedir. Çok noktalı şekillendirme, 3 boyutlu yüzeyler oluşturmak için esnek bir üretim yöntemidir. Ana fikri, tüm kalıbın düzenli ve doğru bir şekilde ayarlanabilen birçok pim'e bölünmesi şeklindedir. Çok noktalı kalıp üzerinde bulunan pimlerin birbirinden bağımsız ve yüksekliklerinin ayarlanabiliyor oluşu, istenilen formların ve 3 boyutlu yüzeylerin oluşturabilmesine imkân tanır. Çok noktalı şekillendirme yöntemi eğer derin çekme prosesine uygulanabilirse, geleneksel derin çekme prosesinin karşılaştığı sorunları ortadan kaldırabilecek potansiyele sahiptir.

Çok noktalı şekillendirme prosesinin doğası gereği, bir bütün halindeyken parçalı bir forma dönüşen kalıp elemanlarından kaynaklanan ve incelenmesi gereken farklı parametrelerde ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda prosesin standart metal levha şekillendirme yöntemleri ile elde edilmesi ciddi zorluklar içeren şekillerin üretimini mümkün kılması da araştırmacıların bu özellikler üzerinde incelemeler yapmasına sebebiyet vermiştir.

Li ve ark., (1999), kalıp üzerinde bulunan pimlerin yüksekliklerinin ayarlanma şekline göre çok noktalı şekillendirme prosesini dört çeşit olarak tanımlamışlardır. Çok noktalı kalıp, çok noktalı yarım kalıp, çok noktalı pres ve çok noktalı yarım pres adını verdikleri çeşitleri inceleyen araştırmacılar, metal levhanın şekillendirilmesi esnasında pimlerin dizilimini değiştirerek izlenen farklı yolların getirdiği şekil değiştirme miktarlarını ve özelliklerini incelemişlerdir. Li ve ark. (2002), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada, çok noktalı şekillendirme prosesinde meydana gelen yüzey bozukluklarını incelemişlerdir. Esnek bir iş parçası tutucu (sıyırıcı) kullanarak parça yüzeyinde meydana gelen kırışmaları engellemeyi başaran araştırmacılar, prosesin kendine özgü en belirgin hatalarından olan ve birbirinden bağımsız pimlerin uyguladığı baskı sonucu iş parçası yüzeyinde şekillendirme esnasında meydana gelen çukurların farklı pim dizilimleri uygulanarak azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Cai ve Li (2005), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, çok noktalı şekillendirme prosesi vasıtasıyla şekillendirilen metal levha için elastik-plastik malzeme modelini incelemişler ve güncellenmiş Lagrangian formülasyonunu temel alan bir yaklaşım

geliştirmişlerdir. Ayrıca levha üzerinde oluşan gerilmelerin entegrasyonu için de bir algoritma oluşturmuşlardır.

Liu ve ark. (2008), çok noktalı şekillendirme prosesinin kalıp setinde yer alan pimleri bilgisayar kontrollü olacak şekilde tasarlamışlardır. Kullandıkları ekipmanların özelliklerinin ve pin boylarının hangi koşullara bağlı kalınarak ayarlanacağını, tasarım ilkelerinin ve ayar modlarının detaylarını paylaşan araştırmacılar daha sonrasında bu yöntemleri kullanarak geleneksel metal levha şekillendirme yöntemleri ile gerçekleştirilemeyecek düzeydeki formları oluşturmayı başarmışlardır.

Qian ve ark (2007), çok noktalı şekillendirme yöntemine ait iki farklı şekillendirme tipini incelemişlerdir. Düz metal levhaya çanak formu vermek için kullanılan bu iki tipin ilkini çok adımlı şekillendirme olarak tanımlamışlardır. Metod, oluşturulması planlanan çanak formuna ait derinlik değerinin iş parçasına birkaç adımda verilmesi prensibine dayanmaktadır. İkinci tip olan kesit şekillendirme metodunda ise metal levhanın belirli kısımları parça parça çok noktalı şekillendirme işlemine tabi tutulmaktadır. Araştırmacılar bu iki metodu kullanarak hem deneysel hem de nümerik çalışmaları yapmışlar ve iki metodun metal levhanın şekillendirilmesi esnasında olan etkilerini incelemişlerdir.

Zhu ve ark. (2019), kare pimlerin çok noktalı şekillendirme prosesi üzerindeki etkilerini ve dış büyü olarak şekillendirilen farklı kalınlıklara sahip metal levhanın geri esneme davranışlarını araştırmışlardır. Metal levhanın şekillendirme mekanizmasını ve geri esneme özelliklerini analiz etmek için teorik denklemler türetmiş, elde ettikleri teorik ve analitik sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamış ve metal levhanın göstereceği davranışları tanımlamışlardır.

Tandoğan ve ark. (2020), değişik sayıdaki dizilime sahip ve farklı çapa sahip pimlerin sabit bir alt kalıp formu üzerinde şekillendirilen Al 1100 H14 alüminyum levha iş parçasına olan etkilerini incelemişlerdir. İlk dizilim 10 mm çapında 13 pim, ikinci dizilim ise 5 mm çapında olan 25 pimden oluşmakta ve her bir dizilimde pimler arasında 1 mm mesafe bulunmaktadır. Sonlu eleman analizinin kullanıldığı çalışmada farklı dizilimlerin levha üzerinde belirlenen noktalardaki yük dağılımlarına ve hasar oluşumlarına olan etkileri ortaya konulmuştur.

Tandoğan ve ark. (2023), yapmış oldukları bir başka çalışmada çok noktalı şekillendirme prosesinde kullanılan pim çaplarının etkilerini gözlemlemişlerdir. 0,5 mm kalınlığındaki Al 1100 alüminyum alaşımından olan iş parçasına üç farklı form verilmiştir. Bu formların oluşturulması esnasında 10 mm, 12 mm, 14 mm çapa sahip pimlerin levhada meydana getirdiği stres dağılımı, yük dağılımı ve kalınlık dağılımlarının hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirerek sonuçları karşılaştırmışlardır.

Daha önce yapılan örnek çalışmalardan anlaşılacağı üzere çok noktalı şekillendirme klasik şekillendirme yöntemleri

ile elde edilemeyecek şekillerin metal levha üzerinde verilebilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sebeple derin çekme prosesine ait kalıp elemanlarının çok noktali şekillendirme elemanlarında olduğu gibi pimlerle değiştirilmesi sonucunda prosesin geliştirilmesine katkı sağlanabilecektir. Tıpkı çok noktali şekillendirme prosesinde olduğu gibi çok noktali derin çekme olarak isimlendirilen bu proses üzerine yapılan çalışmalarda bulunmaktadır.

Beglarzadeh ve Davoodi'nin (2016), deneysel ve sayısal teknikler kullanarak çok noktali derin çekme prosesine ilişkin yaptıkları çalışmada, sıyrıcının uyguladığı farklı kuvvet değerlerinin iş parçası yüzey kalitesine nasıl etki ettiğini araştırmışlardır. Çalışma da 300 adet pim kullanarak 1 mm kalınlığa sahip Al2024 alüminyum alaşımını kare formunda derin çekme işlemine tabi tutmuşlardır. Çukur oluşumlarının engellenmesi amacıyla 10 mm kalınlığında poliüretan ped kullanılmıştır. Sıyrıcı için 1200 N, 1600 N ve 2000 N olacak şekilde yük değerleri uygulanmıştır. Ayrıca, aynı koşullar ABAQUS/EXPLICIT yazılımı kullanılarak da simüle edilmiştir. Araştırmacılar, değişen sıyrıcı yüklerinin iş parçasında kırışıklık ve kopma oluşumu üzerindeki etkisini göstererek, 2000 N'lik yükün en iyi sonuçları verdiğini belirtmişlerdir.

Zareh-Desari ve ark. (2017), çok noktali derin çekme prosesini kullanarak derin çekme işlemini gerçekleştirmek amacıyla 1 mm kalınlığında ve 220x220 mm boyutlarında Al 2024-O alüminyum alaşımı iş parçası kullanmışlardır. Kalıp seti, 12 mm çapında dairesel pimlerden oluşmakta ve tamamen ayarlanabilir yapıdadır. Çukur oluşumlarının incelenmesi amacıyla her biri farklı sertlik değerlerine sahip kauçuk ve poliüretan gibi çeşitli tipte pedler kullanılmıştır. Her biri farklı boyutlarda iki ayrı kare iş parçası üretilmiş ve proses Abaqus/CAE 6.9.1 yazılımı kullanılarak da aynı koşullar altında proses simüle edilmiştir. Yırtılmaların iş parçası üzerindeki konumu ve kopma derinliği gibi özellikler gözlemlenmiştir. Daha yüksek sertliğe sahip ped kullanımının iş parçasının çekme derinliğini arttırdığını ve yüzeyde daha az çukur meydana getirdiğini belirtmişlerdir.

Yaşar ve ark. (2007), kalınlığı 0,8 mm olan DC04 çelik levhadan düzensiz şekilli dikdörtgen bir parçanın imalatını çok noktali derin çekme prosesini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, iş parçası üzerinde

herhangi bir kopma durumu olmadan etkili bir şekilde uygulanabilecek limit koşullarını belirlemek amacıyla derin çekme hızının, takım geometrisinin ve derin çekmenin diğer ilgili özelliklerin etkisini ortaya koymuşlardır.

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde çok noktali derin çekme prosesi üzerine yapılan yayın sayısının azlığı dikkat çekmektedir. Bu sebeple prosese ait birçok parametrenin araştırılmamış olduğu ve literatürde bir boşluk yarattığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, çok noktali derin çekme işleminde farklı pim uç radyus değerlerinin (1 mm, 3 mm ve 6 mm) etkisinin sonlu elemanlar analizi yöntemiyle incelenmesidir. Çalışma için 130x130 mm boyutlara sahip, 0,75 mm kalınlığında Al 3003 HX6 alüminyum alaşımı iş parçası temin edilmiştir. Ayrıca, sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel olarak da doğruluğunun sağlanması amacıyla bir adet çok noktali derin çekme seti tasarlanarak, imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen bulgular sonlu elemanlar analizinden elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Bulgular arasında tutarlılık sağlandıktan sonra geri kalan radyus değerleri için sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonlar yapılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Radyuslarda olan değişimlerin yük dağılımına, hasar değerlerine ve stres dağılımına ne düzeyde etki ettiği incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Deneysel Çalışma

Deneysel ve sonlu eleman analizleri için levha halinde, 0,75 mm kalınlığında AISI Al 3003 HX6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Temin edilen levha 130x130 mm boyutlarda kare parçalar olarak kesilmiştir. AISI Al 3003 HX6 diğer alüminyum çeşitlerine göre daha sünek olup dövme, ekstrüzyon ve derin çekme gibi şekillendirme proseslerine gayet uygundur. Aşındırıcı atmosferik koşullara ve korozyona olan dayanıklılığı, bunun yanında kaynak edilebilirliği sebebiyle özellikle havacılık ve denizcilik sektöründe yaygın bir kullanıma sahiptir (Park ve ark., 2004). AISI Al 3003 HX6'nın kimyasal kompozisyonu Tablo 1.'de verilmiştir.

Temin edilen iş parçası ASTM E8 standardına bağlı kalınarak U-Test marka çekme testi cihazında, 0,5 s⁻¹ şekil değiştirme hızında çekme testine tabi tutulmuştur.

Tablo 1. AISI Al 3003 HX6' nın kimyasal kompozisyonu

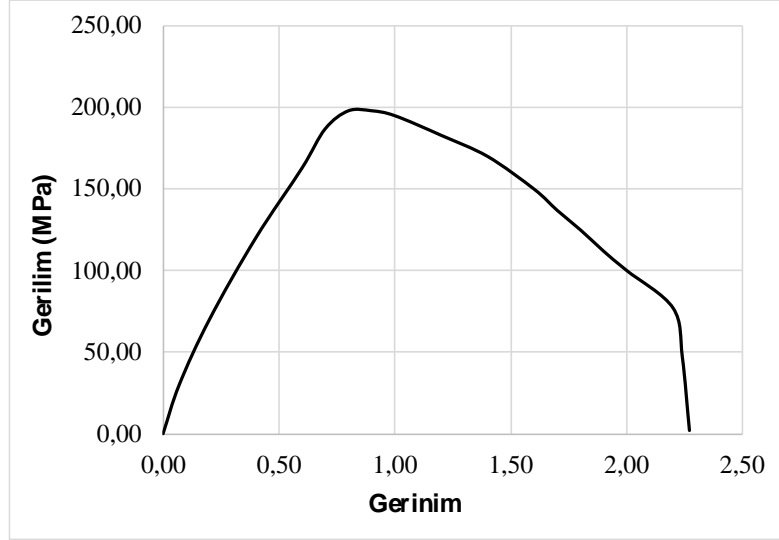
Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Al	Diğer
0,6	0,1	1,25	0,1	0,05	Kalan	0,15

Çekme testi 6 kez gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan numunelerden bir tanesi örnek olarak Şekil 1' de

görülmektedir. Elde edilen gerilme-gerinim eğrisi ise Şekil 2' de verilmiştir.



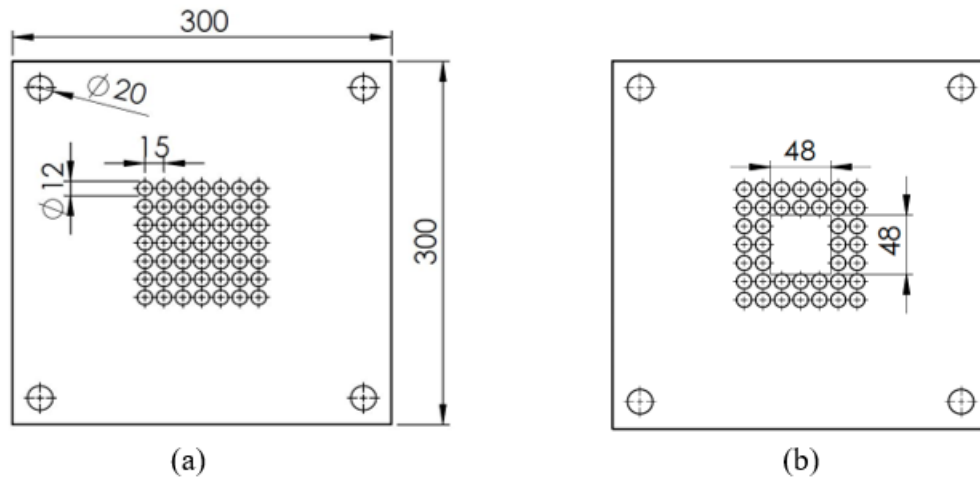
Şekil 1. Çekme testi numunesi.



Şekil 2. Al 3003 HX6 alüminyum iş parçası mühendislik gerilim-gerinim eğrisi.

Deneilerin gerçekleştirilmesi amacıyla bir adet çok noktalı derin çekme kalıp seti imal edilmiştir. Alt ve üst kalıbın tamamı 87 mm uzunluğunda, 12 mm çapında, 6 mm radyusa sahip pimlerden oluşacak ve 7x7'lik kare bir matris oluşturacak şekilde tasarlanan kalıbın tüm parçaları AISI 4140 çelik malzemeden üretilmiştir. Bu tip kalıp imalatı uygulamalarında kullanılan AISI 4140, tercih edilen ve dayanımı yüksek bir çelik türüdür (Borchers, 2021). Kalıpla aynı malzemeden imal edilen pimlerin dayanımının ve sertliğinin artırılması amacıyla tüm pimler ısıl işlem görmüştür. Alt ve üst kalıba 7x7'lik

bir matris oluşturacak şekilde dizilen pimlerin merkezleri birbirlerinden 15 mm uzaklıktadır. Pimlerin kalıba yerleştirilebilmesi için alt ve üst kalıplarda pimlerin geleceği yere M8 vida dişi açılmıştır. Aynı şekilde vidaların içerisine 45 mm uzunluğunda M8 kılavuz çekilmiştir. Alt kalıp içerisinde 48x48 mm'lik bir kalıp boşluğu oluşturulacak şekilde pimler eksiltilmiş, derin çekme işleminin gerçekleştirilebilmesi için üst kalıpta bulunan ve alt kalıp boşluğunun karşısına gelen pimler 30 mm uzatılmıştır. Oluşturulan (a) üst ve (b) alt kalıba ait teknik çizimler Şekil 3'te görülmektedir.

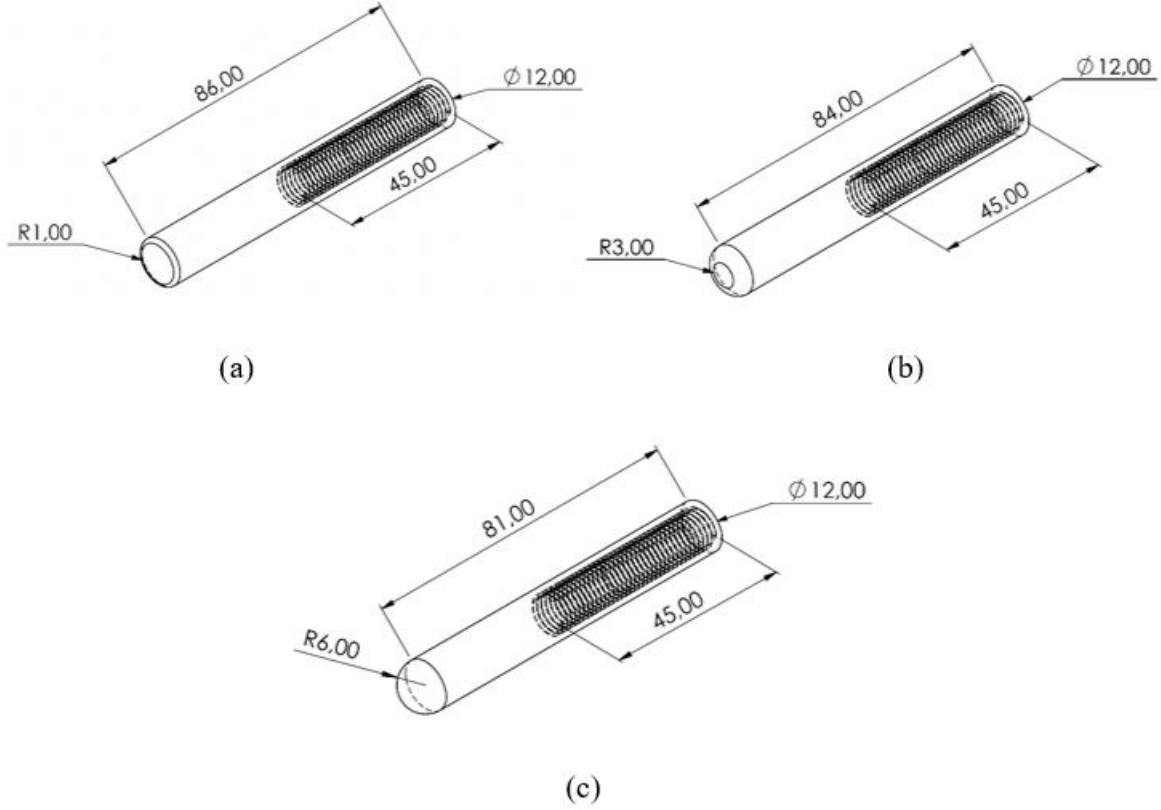


Şekil 3. İmal edilen çok noktalı derin çekme kalıp setine ait teknik çizimler (a) üst kalıp, (b) alt kalıp.

Çalışma da pimlerin radyuslarının etkisi inceleneceğinden dolayı aynı ölçülere sahip ancak uç radyusları 1 mm, 3 mm ve 6 mm olacak şekilde üç farklı pim tipi tasarlanmış ve daha önce de belirtildiği gibi bu tiplerden 6 mm uç radyusuna sahip olan pimin deneysel çalışma için imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan pimlerin teknik çizimleri Şekil 4'te verilmiştir. Deneysel çalışma, Tarsus Organize Sanayi Bölgesi'nde

bulunan Berdan Civata tarafından sağlanan üniversal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Makine 30 kN yük kapasitesine sahip olup deneyler 1 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir.

Pimler ile levha arasındaki yağlama, SEA 40 yağı kullanılarak sağlanmıştır. İmal edilen kalıp seti ve iş parçasına ait deney görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı uç radyuslarına sahip pimlerin teknik çizimleri (a) 1 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm.



Şekil 5. İmal edilen kalıp seti ve iş parçasına ait deney görüntüsü.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

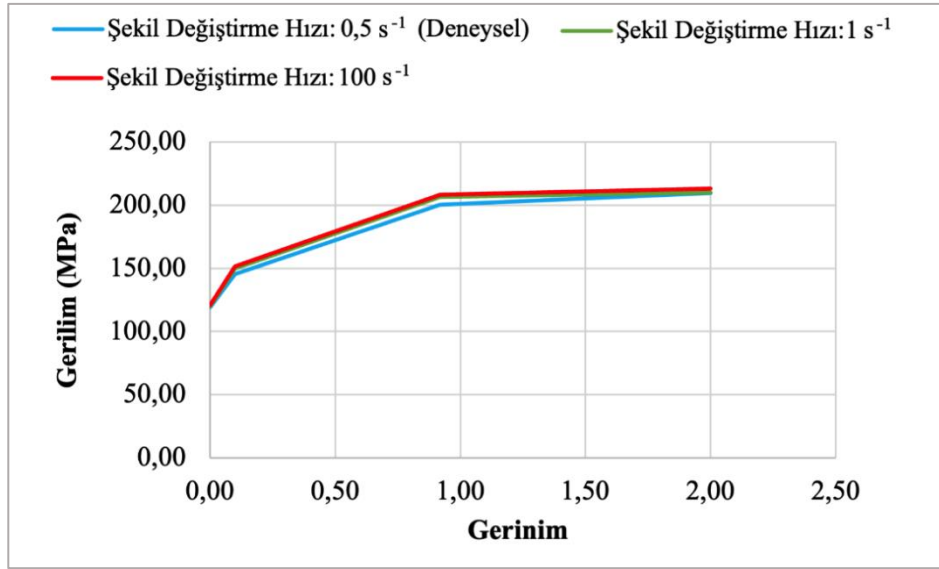
Sonlu elemanlar analizleri, Scientific Forming Technologies Corporation'a ait Deform-3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Prosesin 3 boyutlu olarak simüle edilmesi uzun bir zaman almaktadır. Çalışmanın ana hedefi iş parçası üzerinde oluşan etkileri incelemek olduğundan hesaplama hızının artırılması ve böylece simülasyon zamanlarının azaltılması amacıyla üst plaka, alt plaka ve pimler deforme olmayan katı gövdeler olarak tanımlanırken, iş parçası da elasto-plastik bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Çekme testinden elde edilen değerler sonucunda, Al 3003 HX6 alüminyum malzemenin akış gerilimi eğrileri Holloman denklemi kullanarak bulunmuştur. Hollomon denklemi

Eşitlik 1'de verilmiştir;

$$\bar{\sigma} = K\varepsilon^{-n} \quad (1)$$

Burada $\bar{\sigma}$; etkin gerilim, ε ; etkin gerinim, K; malzeme sabiti ve n; gerinim sertleşmesi katsayısını ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda çizilen akış gerilim eğrileri ve Deform-3D yazılımının veri tabanında Al 3003 alüminyum malzeme için bulunan akış gerilim eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Deneysel olarak elde edilen ve yazılım veri tabanında bulunan akış gerilimi eğrilerinin karşılaştırılması.

Görüldüğü üzere deneysel olarak elde edilen sonuçlar ve programın kendi veri tabanında bulunan değerler birbiri ile örtüşmektedir. Derin çekme işlemi sırasında önemli bir parametre olan yırtık (kırılma) oluşumunun simüle edilebilmesi için DEFORM-3D yazılımı içerisinde kırılma kriterinin tanımlanması gerekmektedir. Çok noktalı derin çekme işlemi için normalleştirilmiş Cockroft & Latham kırılma kriteridir seçilmiştir. Bu kriter, gerinim değerlerinin hassas şekilde ölçümüne imkân tanımaktadır. Kritere göre kırılma başlangıcı, etkili gerinim değerinin kritik değere (C) ulaştığı noktada meydana gelir. Kriter, Eşitlik 2'de verilmiştir;

$$\int_0^{\varepsilon^{-f}} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} = C, \quad (2)$$

σ^* ; maksimum asal çekme gerilmesini, ε^{-f} ; kırılma gerinimini ve C ise kritik kırılma değerini göstermektedir. $\bar{\sigma}$; efektif gerilim ve $\bar{\varepsilon}$; efektif ve olarak ifade edilmiştir. Kritik değeri ifade eden C, çekme testi ile bulunmaktadır ve çalışma koşullarından bağımsızdır. Bu değer 0,35 olarak bulunmuştur.

İş parçası ile pimler arasındaki sürtünme katsayısının sabit kalacağı ve 0,1 olarak belirlenmiş bir değerle Coulomb modelini takip edeceği varsayılmıştır.

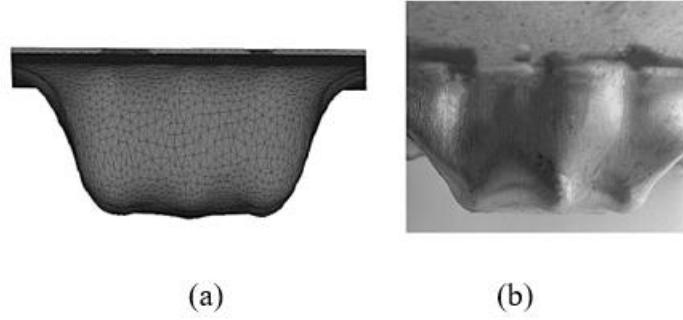
Deform-3D yazılımı, simülasyonları gerçekleştirirken iş parçası üzerinde oluşturduğu ağ elemanları vasıtasıyla şekil değiştirme ve gerilim değerlerini hesaplamakta, eğer ağ elemanlarından herhangi biri C ile belirtilen kırılma değerine ulaşırsa, ilgili ağ elemanını silmektedir. Yazılımın çok noktalı derin çekme işlemi en gerçekçi olarak simüle edebilmesi için ağ elemanı sayısının olabildiğince fazla olması gerekmektedir. Eğer ağ elemanı sayısı az olursa gerek görsel geri bildirim gerekse hesaplama hataları meydana gelmektedir. Deneysel sonuçlara olabildiğince uyumlu nümerik analiz sonuçları elde edebilmek için ağ elemanı sayısının olabildiğince fazla ve şekil değiştirme bölgelerinde yoğunlaşmış olması şarttır. Ancak, gereğinden fazla eleman kullanmakta simülasyon sürelerini ciddi derecede uzatmaktadır. Bu sebeple nümerik analizlere geçilmeden önce çalışmada kullanılan deney setine karşılık gelen ve 6 mm radyusa sahip pimlerle gerçekleştirilen çok noktalı derin çekme prosesi birçok kez farklı ağ elemanı sayıları ile simüle

edilmiş, tetrahedral (dört yüzlü) tip 340.000 adet ağ elemanı sayısına ulaşıldığında ve bu eleman sayısının daha üst değerlerine çıktığında sonuçların değişmediği belirlenmiştir. Ağ elemanı boyutu 0,03 mm olarak tanımlanmış ve kalıbın her 0,1 mm ilerlemesinde ağ elemanların yenilenmesi için yazılımın otomatik ağ yenileme özelliği kullanılmıştır. Gerek deneylerde gerekse simülasyonlarda sıyrıcı kullanılmamış ve malzemenin ne kadarlık bir kırılmaya uğrayacağı da incelenmiştir.

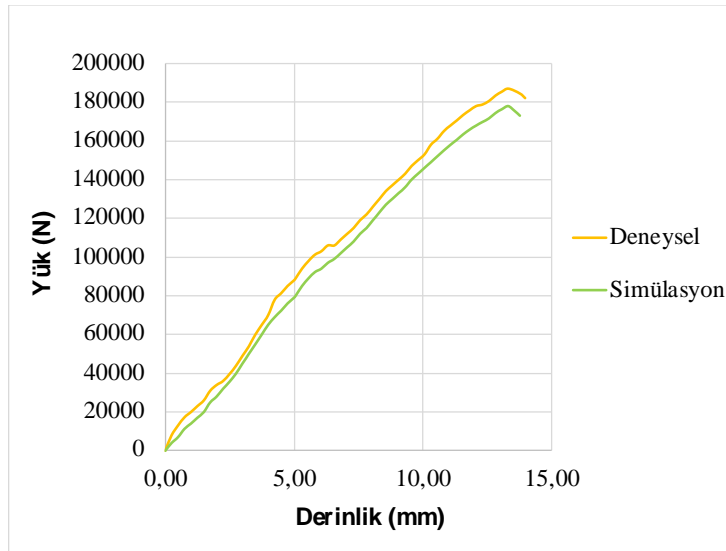
3. Bulgular ve Tartışma

Sonlu eleman analizlerinin sağlıklı olarak gerçekleştirilebilmesi için yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçların doğrulanması şarttır. Eğer deneysel

sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasındaki fark büyükse, daha sonrasında gerçekleştirilecek analizler hatalı ve gerçekten uzak olacaktır. Hazırlanan çok noktalı derin çekme kalıp seti ile deneyler gerçekleştirilmiş ve aynı koşullar altında yürütülen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucunda (a) iş parçası üzerinde elde edilen derin çekme formuna ait görüntü ve (b) deney sonrasında elde edilen görüntü Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’den anlaşılacağı üzere, görsel olarak simülasyon ve deneysel sonuçları birbirleriyle uyumludur. Diğer bir karşılaştırma ise prosesin gerçekleştirilmesi esnasında uygulanan yükün değişimi üzerine yapılmış ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çok noktalı derin çekme görüntüleri (a) simülasyon, (b) deneysel.

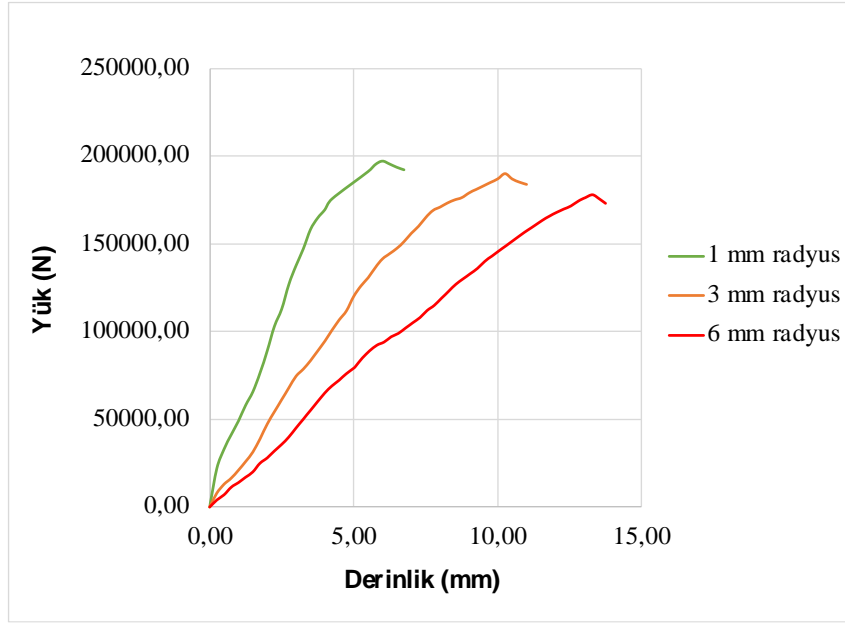


Şekil 8. Deney ve simülasyon sonrasında elde edilen yük değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7 ve Şekil 8’den görülebileceği üzere deney ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile uyumlu oldukları anlaşılmaktadır. Yük değişimleri karşılaştırıldığında yaklaşık %7,35’lik bir fark olduğu görülmektedir. Deney ve simülasyon sonuçlarının tutarlılığı sağlandıktan sonra geri kalan radyus değerlerine ait çok noktalı derin çekme işlemleri yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonlar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

3.1. Yük ve Hasar Sonuçları

Metal levha şekillendirme proseslerinde en önemli parametrelerden bir tanesi derin çekmenin gerçekleştirilmesi için gereken şekillendirme yüküdür. Yük değeri, kullanılması gereken pres kapasitesini direkt belirleyen bir parametredir. Simülasyon çalışmaları sonucunda 1 mm, 3 mm ve 6mm uç radyuslarına sahip olan pimlerle yapılan simülasyonlardan elde edilen yük değişimleri Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Farklı radyuslara ait yük değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 9'dan anlaşılacağı üzere radyusların azalması, derin çekme için gereken yükü artırmıştır. Ortalama yük değerleri incelendiğinde 1 mm ve 3 mm radyusa sahip pimlerin oluşturduğu yük arasında % 3,70 oranında bir fark varken, 3 mm ve 6 mm radyusa sahip pim arasında % 16,83'lük bir fark olduğu görülmüştür.

Bu durum, pimlerin uç noktalarındaki temas alanında olan farklılıklar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bir levha şekillendirme operasyonundaki yük büyüklüğü, zımbanın temas alanından doğrudan etkilenmektedir (Engin ve Eyercioglu, 2017). Çok noktalı derin çekme prosesinde zımbanın parçalı yapısının bir sonucu olarak, her bir pim, uygulanan yükü bağımsız olarak iş parçasına iletmektedir. Pimlerin uçlarına verilen radyus ne kadar büyükse levha üzerine temas eden pim yüzey alanı azalmaktadır. Bu durumda gerekli şekillendirme yükünü azaltmaktadır.

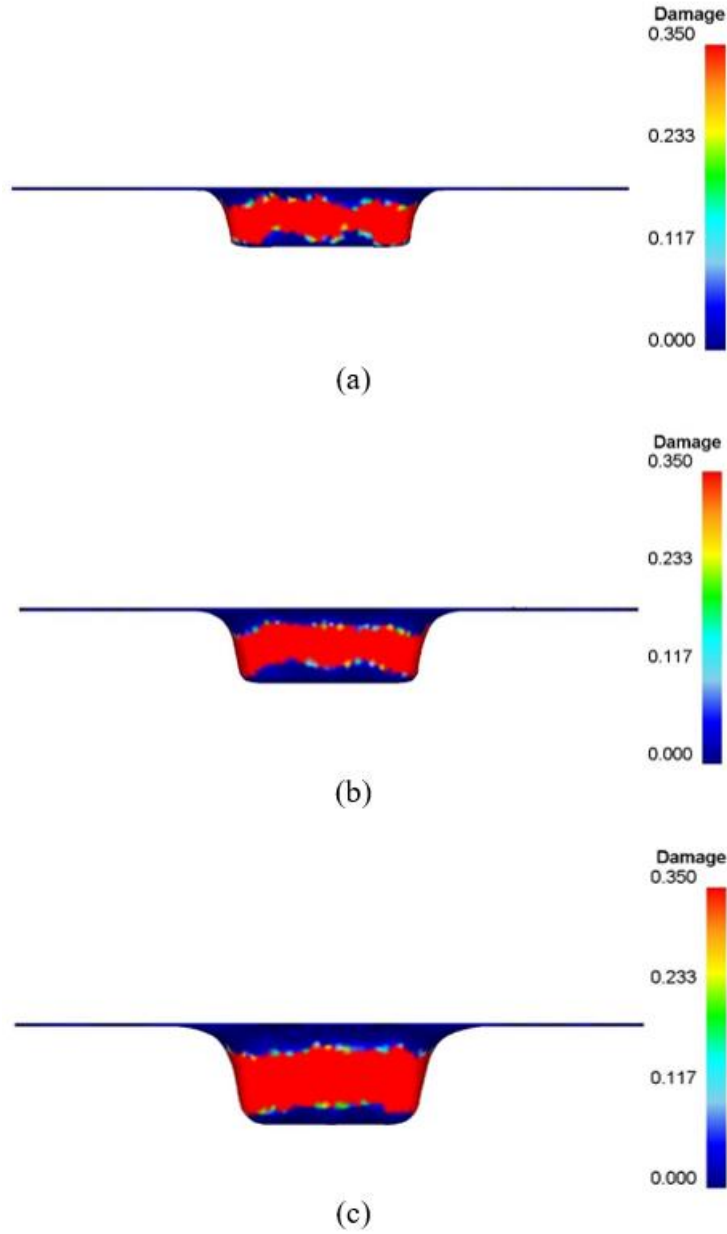
Şekil 9'da dikkat çeken diğer hususlardan bir tanesi de yük grafiklerinin yükseldikten sonra bir anda kesilmesidir. Bu kesilme noktaları malzeme üzerinde yırtık oluştuğu derinliği göstermektedir. Pimlerin uç radyusu arttıkça, malzemenin maksimum çekilebilme ve ilk yırtığın oluştuğu derinlik artmaktadır. 1 mm ve 3 mm uç radyusu olan pimler arasında %42,8'lik bir derinlik farkı olduğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde 3 mm ve 6 mm

uç radyusu olan pimler arasında ise %30,56 derinlik farkı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle radyusun azalmasının malzemenin çekme derinliğini azalttığı ve gereken şekillendirme yük değerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Aynı şekilde Al 3003 HX6 alüminyum alaşım iş parçası üzerinde oluşan hasar miktarları da bu bulguları destekler durumdur. İş parçası malzemesi için bulunan kritik değer C: 0,35 olarak tespit edildiği daha önce belirtilmiştir. Çok noktalı derin çekme işlemi esnasında yırtık oluşumunun hemen öncesinde kritik değere ulaşan bölgeleri belirten görseller (a) 1 mm radyusa sahip pim, (b) 3 mm radyusa sahip pim ve (c) 6 mm radyusa sahip pim için Şekil 10' da verilmiştir.

Şekil 10'da bulunan görsellerden anlaşılacağı üzere iş parçası üzerinde hasarın en çok oluştuğu bölgeler derin çekme prosesine özgü olarak malzemenin alt kalıp ve üst kalıp arasında kalan yan duvarlarıdır. Şekiller sırasıyla incelendiğinde radyusun artmasıyla beraber çekme derinliğinin de arttığı bir kez daha görülmüştür.

Radyusun azalması, pimlerin iş parçası ile temas eden yüzey alanını artırırken, aradaki sürtünme alanını da arttırmakta ve malzemenin şekil değişimi esnasında pim formu üzerindeki kayma hareketi daha az olmaktadır (Li ve ark., 2002).

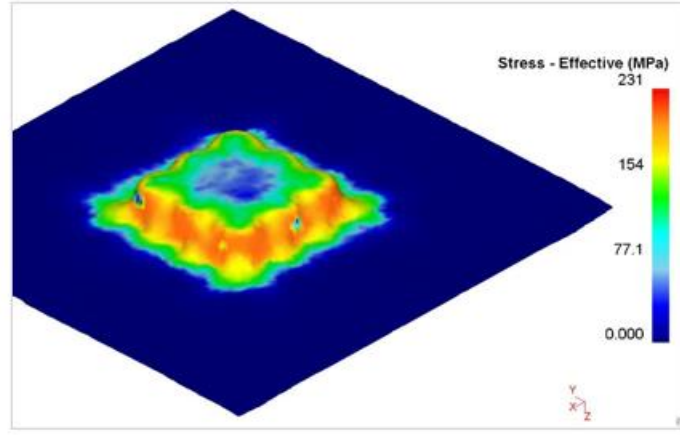


Şekil 10. Farklı radyusların oluşturduğu hasar durumları (a) 1 mm radyusa sahip pim, (b) 3 mm radyusa sahip pim ve (c) 6 mm radyusa sahip pim.

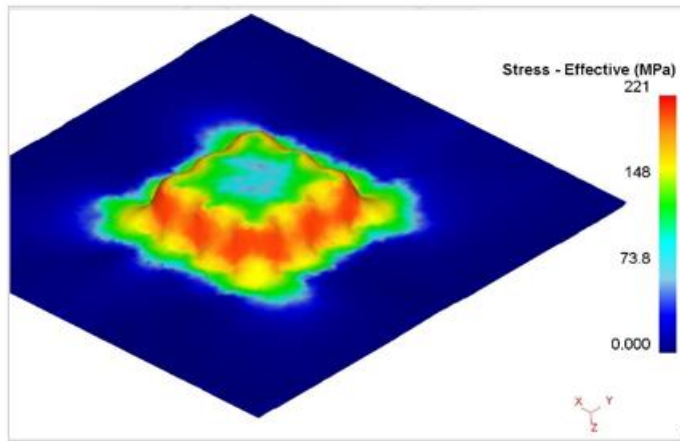
Ayrıca küçük radyus değerinden dolayı uçlardaki yuvarlaklığın azalması, malzemenin alt kalıp ve pim arasında daha fazla sıkışmasına sebebiyet vererek malzemenin yırtılmayla sonuçlanacak hasar değerine daha hızlı ulaşmasına neden olmuş, bu sebeple çekme derinliği azalmıştır.

3.2. Gerilim Dağılımı

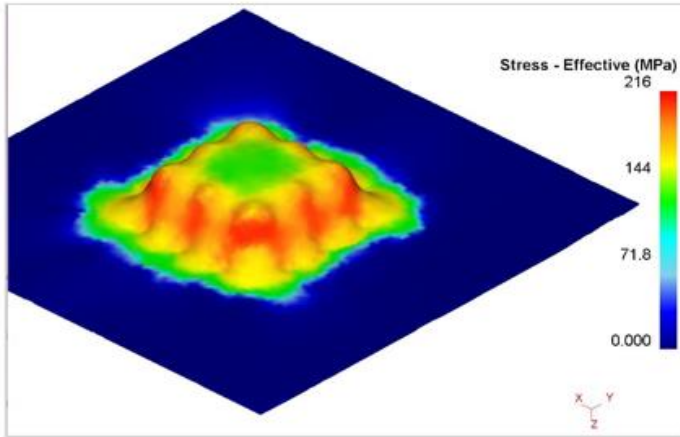
Malzeme üzerinde oluşan gerilim dağılımı, şekillendirilebilirlik üzerinde doğrudan etkili olan bir parametredir. Şekil 11' de Al 3030 HX6 alüminyum malzeme üzerinde oluşan gerilim dağılımları (a) 1 mm radyusa sahip pim, (b) 3 mm radyusa sahip pim ve (c) 6 mm radyusa sahip pim için verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 11. Farklı radyusların oluşturduğu gerilim dağılımları (a) 1 mm radyusa sahip pim, (b) 3 mm radyusa sahip pim ve (c) 6 mm radyusa sahip pim.

Şekil 11 incelendiğinde 1 mm radyusa sahip pim kullanımı sonucu elde edilen maksimum efektif gerilme değerinin 231 MPa, 3 mm radyusa sahip pim kullanımı sonucunda edilen maksimum efektif gerilme değerinin 221 MPa, 6 mm radyusa sahip pim kullanımı sonucunda elde maksimum efektif gerilme değerinin ise 216 Mpa

olduğu bulunmuştur. İş parçasının üzerinde oluşan maksimum gerilme değerlerinin pim radyusu ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Daha önceki bulgularla uyumlu olarak, 1 mm radyusa sahip pim kullanımı sonucunda diğer radyus değerlerine göre daha düşük çekme derinliğinde, daha da yüksek efektif gerilme

değerine sahip olmaktadır. 1 mm radyus ile 3 mm radyusa sahip pimler arasında % 4,52, 3 mm ve 6 mm radyusa sahip pimler arasında ise % 2,31'lik bir efektif gerilme farkı olduğu hesaplanmıştır. Bu durumunda temel sebebi, daha düşük radyus olan sonucunda yüzey alanının artması ve lokal gerilmelerinde buna bağlı olarak artmasıdır (Tandoğan ve ark., 2023).

4. Sonuç

Bu çalışmada 0,75 mm kalınlığında AISI Al 3033 HX6 alüminyum alaşımı levha, çok noktalı derin çekme prosesi ile derin çekilmiş, çok noktalı kalıp setini oluşturan pimlerin uç raydus değerlerinin değişimi sonucunda (1 mm, 3 mm, 6 mm) proses çıktılarındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Çok noktalı derin çekme prosesine özgü olarak kullanılan ve iş parçası ile temas eden pimlerin uç radyuslarının proses çıktıları üzerine etkisi olduğu görülmüştür.
- Radyus değerleri azaldıkça iş parçası ile temas eden yüzey alanı artmaktadır. Yüzey alanının artması, derin çekme prosesi için gerekli olan yük değerini ciddi derecede arttırmaktadır. Bu durum pres kapasitesinin de arttırılması ve daha fazla enerji harcanması manasına gelmektedir.
- Düşük radyus değerine sahip pimlerin kullanımı sonucunda maksimum efektif gerilmelerin ve hasar oranlarının daha düşük çekme derinliğinde, daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Düşük radyus kullanımı malzemenin daha kısa bir çekme derinliğinde yırtılmasına sebebiyet vermektedir.
- Çekme derinliği ve gereken yük ihtiyacı olarak en iyi sonuçlara 6 mm uç radyusunun kullanımı sonucunda ulaşılmıştır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	K.E.E
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar, bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Beglarzadeh B, Davoodi B. 2016. Numerical simulation and experimental examination of forming defects in multi-point deep drawing process. *Mechanics*, 22(3):182-189.
- Borchers F, Clausen B, Ehle L.C, Eich M, Epp J, Frerichs F, Hettig M, Klink A, Kohls E, Lu Y, Meyer H, Rommes B, Schneider S, Strunk R, Zielinski T. 2021. The influence of former process steps on changes in hardness, lattice and micro structure of AISI 4140 due to manufacturing processes. *Metals*, 11(7): 1102.
- Cai ZY, Li MZ. 2005. Finite element simulation of multi-point sheet forming process based on implicit scheme. *J. Mater. Process. Technol*, 161(3):449-455.
- Engin K.E, Eyercioglu O. 2017. The effect of the thickness-to-die diameter ratio on the sheet metal blanking process. *Stroj. Vestn. J. Mech. Eng.*, 63(9): 501-509.
- Li M, Liu Y, Su S, Li G. 1999. Multi-point forming: A flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet. *J. Mater. Process. Technol*, 87(1-3): 277-280.
- Li MZ, Cai ZY, Sui Z, Yan Q. 2002. Multi-point forming technology for sheet metal. *J. Mater. Process. Technol*, 129(1-3):333-338.
- Liu C, Li M, Fu W. 2008. Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 35: 1227-1233.
- Park C.S, Ku T.W, Kang B.S, Hwang S.M. 2004. Process design and blank modification in the multistage rectangular deep drawing of an extreme aspect ratio. *J. Mater. Process. Technol*, 153: 778-784.
- Qian ZR, Li MZ, Tan FX. 2007. The analyse on the process of multi-point forming for dish head. *J. Mater. Process. Technol*, 187:471-475.
- Tandoğan M, Eyercioglu Ö, Dülger M. 2020. Principles and finite element simulation of multi-point forming technology for sheet metal. *TIJMET*, 3(2): 120-130.
- Tandogan M, Eyercioglu O, Engin KE. 2023. Experimental and numerical investigation on effects of pin diameter on multi-point forming. *Processes*, 11(2):387.
- Yaşar M, Korkmaz Z, Gavas M. 2007. Forming sheet metals by means of multi-point deep drawing method. *Mater. Des.* 28(10): 2647-2653.
- Zareh-Desari B, Davoodi B, Vedaei-Sabegh A. 2017. Investigation of deep drawing concept of multi-point forming process in terms of prevalent defects. *Int. J. Mater. Form.*, 10: 193-203.
- Zhu L, Liang Q, Yu TX, Yuan P, Hu Y. 2019. Experimental and theoretical study of constant curvature multi-square punch forming process of strips under follower load. *Int. J. Mech. Sci.* 156: 462-473.