

AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Kare Kapların Derin Çekme Performansı: Kalıp Geometrisi ve Parametre Optimizasyonu

Engin ÜNAL^{1*}, Umutcan ÖZKAN²

¹ Makine Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ enginunal@firat.edu.tr, ² umutcanozkan23@gmail.com

(Geliş/Received: 14/05/2025;

Kabul/Accepted: 04/07/2025)

Öz: Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sacların kare kap derin çekilmesinde kalıp geometrisi (matris radyüsü: 4, 6, 8 mm; matris-baskı plakası açısı: 0°, 5°, 10°, 15°) ve işlem parametrelerinin (baskı plakası kuvveti (BPK): 5500, 7950, 10400 N) şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı (36 kombinasyon) kullanılarak maksimum zımba kuvveti, ondülasyon, yırtılma ve kulaklanma gibi kusurların parametrelere bağlı değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar, matris açısının 5°-10° aralığında, matris radyüsünün 6-8 mm'de ve BPK'nın 7950-10400 N aralığında optimal performans sağladığını göstermiştir. Özellikle 10° açıda yırtılma riski artarken, radyüsün 8 mm'ye çıkarılması ondülasyonları azaltmış ancak lokal gerilim birikimine neden olmuştur. BPK'nın artması, ondülasyonları minimize etmiş ancak aşırı sıkıştırma plastik deformasyon kapasitesini sınırlamıştır. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalarda kusursuz üretim için parametre optimizasyonuna kritik katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Derin çekme, AISI 304, parametre optimizasyonu, şekillendirilebilirlik.

Deep Drawing Performance of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Square Cups: Die Geometry and Parameter Optimization

Abstract: This study experimentally investigates the effects of die geometry (matrix radius: 4, 6, 8 mm; die-blank holder angle: 0°, 5°, 10°, 15°) and process parameters (blank holder force (BHF): 5500, 7950, 10400 N) on the formability of AISI 304 austenitic stainless steel sheets in square cup deep drawing. A full factorial experimental design (36 combinations) was employed to analyze the variations in maximum punch force, wrinkling, tearing, and earing defects. Results indicate that optimal performance is achieved with a die angle of 5°-10°, matrix radius of 6-8 mm, and blank holder force of 7950-10400 N. While a 10° angle increased tearing risk, increasing the radius to 8 mm reduced wrinkling but caused localized stress concentration. Higher blank holder force minimized wrinkling but limited plastic deformation due to over-constraint. These findings provide critical insights for parameter optimization in industrial applications to achieve defect-free production.

Key words: Deep drawing, AISI 304, parameter optimization, formability.

1. Giriş

Günümüz endüstrisinde üretim verimliliği, zaman ve maliyet optimizasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Sac metal kalıpcılığı, seri üretimde hız, kalite ve ekonomik avantajlar sağlayan kritik bir imalat yöntemidir. Bu yöntem içerisinde öne çıkan derin çekme işlemi, sac levhaların üç boyutlu kap formlarına dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Ancak, işlem sırasında malzeme akışı, gerilme dağılımı ve plastik deformasyon gibi dinamiklerin kontrolü, matris radyüsü, baskı plakası kuvveti (BPK) ve matris-baskı plakası açısı gibi parametrelerin optimizasyonunu gerektirir [2]. Yetersiz parametre seçimi, buruşma (wrinkling), yırtılma (tearing) ve geri esneme (springback) gibi kusurlara yol açarak ürün kalitesini ve üretim verimliliğini düşürmektedir [3].

Derin çekme işleminin karmaşıklığı, çoklu parametrelerin etkileşiminden kaynaklanır. Özellikle AISI 304 östenitik paslanmaz çelik gibi yüksek mukavemetli malzemelerde, şekillendirme sırasında oluşan gerilme konsantrasyonları ve deformasyon davranışı, parametre optimizasyonunu kritik hale getirmektedir [4]. Literatürde, bu parametrelerin etkilerini incelemek için deneysel ve sayısal yöntemlerin entegre kullanımı önerilmiştir.

Derin çekme parametrelerinin optimizasyonu, malzeme davranışı ve ürün kalitesi üzerine yoğunlaşan çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Kayhan ve Kaftanoğlu [1], yüksek mukavemetli çeliklerde ısıtma ve soğutma stratejileri ile limit çekme oranını (LÇO) %25,58 artırmıştır. Luo ve ark. [2], mikro derin çekmede baskı plakası boşluğunun kalınlık dağılımı ve şekil doğruluğu üzerindeki etkisini vurgularken; Dal [3], kare ve silindirik kaplarda buruşma analizi için farklı akma kriterlerini karşılaştırmıştır.

* Sorumlu yazar: enginunal@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-0501-3690, ² 0000-0002-2043-4733

Östenitik paslanmaz çeliklerin deformasyon davranışı, iki fazlı modellerle incelenmiş [4], uzun vadeli termal yaşlanmanın kırılma direncini düşürdüğü gösterilmiştir [5]. Eklemeli üretimle elde edilen SLM 304L çeliğinin yorulma performansı [6] ve AISI 304'ün kesme parametrelerine bağlı kalıcı gerilme dağılımları [7] detaylandırılmıştır.

Parametre optimizasyonunda Taguchi yöntemi [8] ve hidromekanik derin çekme [9,10] gibi yaklaşımlar, buruşma ve yırtılma kontrolünde etkili bulunmuştur. Matris açısı ve BPK'nın LÇO üzerindeki pozitif etkisi [11,12], radyüs artışının malzeme akışını iyileştirdiği ve sıcaklık artışının homojen kalınlık dağılımı sağladığı [13,14] rapor edilmiştir.

Mevcut literatür, derin çekmenin çeşitli yönlerini, ayrı ayrı parametrelerin etkilerini, malzeme davranışlarını ve kusur analizlerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Ancak, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirliği üzerindeki matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve baskı plakası kuvveti gibi parametrelerin eşzamanlı ve etkileşimli etkilerinin deneysel olarak incelenmesi konusunda önemli bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Önceki çalışmalar bu parametrelerden bazılarını bağımsız olarak veya sınırlı kombinasyonlarda ele almış olsa da özellikle AISI 304 için bu parametrelerin birleşik etkisinin kapsamlı deneysel analizi henüz yeterince araştırılmamıştır.

Bu çalışma, 0,8 mm kalınlığındaki AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac levhaların derin çekme sürecinde bu üç kritik parametrenin (matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve baskı plakası kuvveti) eşzamanlı etkilerini deneysel olarak inceleyen özgün ve sistematik bir analiz sunmaktadır.

AISI 304 malzemeye uygulanan çoklu parametrelerin eşzamanlı etkilerine odaklanan bu kapsamlı deneysel çalışma, derin çekme mekaniği ve optimizasyonu alanındaki kalıp tasarımı ve proses optimizasyonu için pratik veriler sağlayarak böylece sac metal şekillendirme endüstrisinde ürün kalitesini ve üretim verimliliğini artırmayı ve mevcut bilgi birikimine önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, 0,8 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Mekanik özellikler, 30 kN kapasiteli evrensel çekme test cihazında 0°, 45° ve 90° haddeleme açılarında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmiştir.

Tablo 1. AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
AISI 304	≤0,08	≤2,0	≤0,045	≤0,03	≤0,75	18–20	8–10

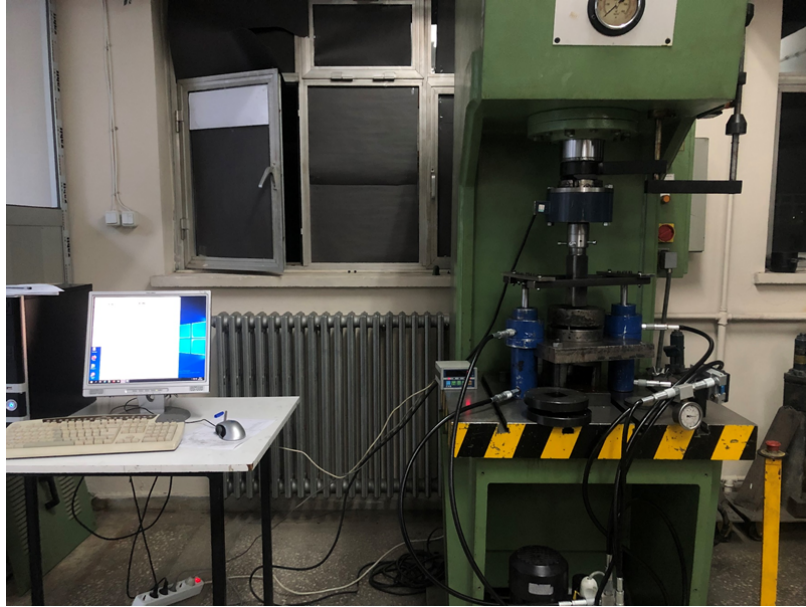
Tablo 2. AISI 304 paslanmaz çeliğin fiziksel özellikleri.

Özellikler	Değerler
Öz kütlesi (kg/m ³)	8000
Erime Sıcaklığı (°C)	1450
Elektriksel direnç miktarı (Ωm)	0,072x10 ⁻⁶
Isı geçirgenliği (W/m.K)	17,2

Tablo 3. AISI 304 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

Hadde Açısı (°)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HB)	Elastisite Modülü (GPa)
0	285,7	391,4	92	193
45	284,2	388,4	92	193
90	316,3	394,6	92	193

Deneyler, Şahinler marka 60 ton kapasiteli C tipi hidrolik pres tezgâhı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kalıp elemanları (matris, zımba, baskı plakası), 1.2080 soğuk iş takım çeliği (58 HRC) ve CK45 çeliğinden (42 HRC) imal edilmiştir. Kuvvet ölçümü için CAS LS-20T yük hücresi ve veri kaydı için CAS 1500A indikatör kullanılmıştır (Şekil 1).

**Şekil 1.** Deney seti ve bağlı olduğu hidrolik pres tezgâhı.

Tam faktöriyel deney tasarımı (36 kombinasyon) ile parametre etkileri değerlendirilmiştir (Tablo 4). Sürtünmeyi azaltmak ve yüzey çizilmelerini önlemek için endüstriyel yağlama yağı kullanılmıştır.

Tablo 4. Derin çekme deneyi parametrelerinin değerleri.

Derin çekme deneyi parametreleri	Seviyeleri
Matris radyüsü (mm)	4 – 6 – 8
Matris-baskı plakası açısı (°)	0 – 5 – 10 – 15
Baskı plakası kuvveti (N)	5500 – 7950 – 10400

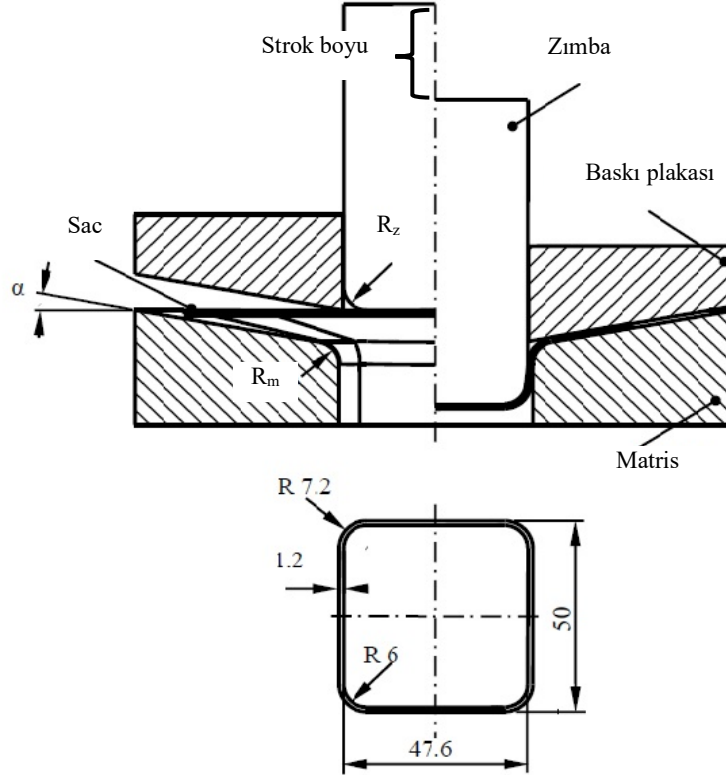
İlkel parça çapı (100 mm), kare kaplar için LÇÖ prensipleri kullanılarak Denklem 1 ve Denklem 2 ile hesaplanmıştır:

$$\beta = \frac{D_0}{d_p} \text{ (LÇÖ)} \quad (1)$$

$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4d_p h} \quad (\text{İlkel parça çapı}) \quad (2)$$

Burada D_0 ilkel parça çapı, d_p zımba çapı, h ise kap yüksekliğidir.

İlkel parçalar, CNC plazma kesim tezgâhı ile 100 mm çapında kesilmiştir. Matris ve zımba, hidrolik prese merkezlenerek monte edilmiştir. Sabit zımba hızında (4 mm/s) gerçekleştirilmiş, kuvvet-deplasman verileri ve ürün kalitesi (yırtılma, buruşma) kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan deney elemanlarının ölçüleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan elemanların ölçüleri.

3. Sonuçlar ve Tartışma

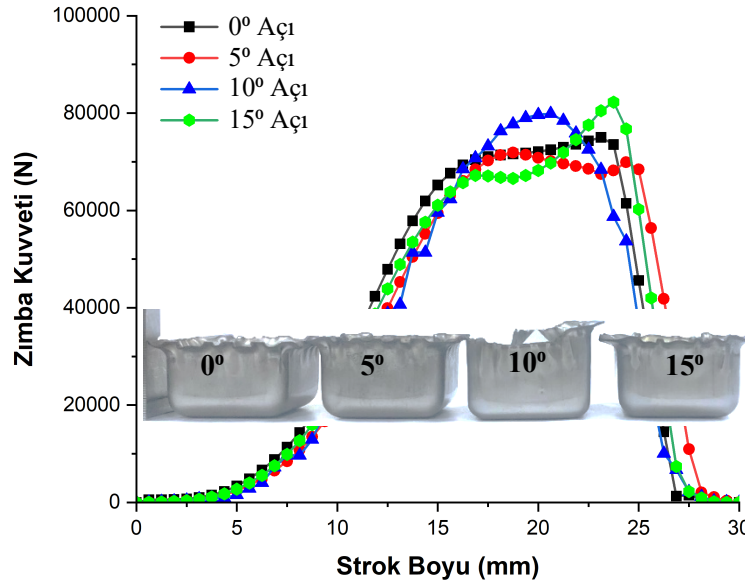
Derin çekme işleminde parametre optimizasyonu, şekillendirilebilirlik ve ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılarak derin çekme işlemine etki eden üç kritik parametrenin (matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK) şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, maksimum zımba kuvveti, ondülasyon, yırtılma ve kulaklanma gibi kusurların parametrelere bağlı değişimini ortaya koymaktadır.

3.1. Parametrelerin Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Açının artması ($0^\circ \rightarrow 15^\circ$), genel olarak maksimum zımba kuvvetinde azalmaya neden olmuştur (Şekil 3). Kalıplama parametrelerinin R 4 mm ve BPK=5500 N durumunda 0° açıda 88996,32 N olan kuvvet, 15° açıda 86426,1 N’a düşmüştür (Tablo 5). Ancak 10° açıda ani yırtılmalar gözlemlenmiş (Şekil 3), bu durum şekillendirilen malzemenin çekme gerilmelerini aştığını göstermektedir. Literatürdeki [15] nolu referanstaki çalışmalar da benzer şekilde 8-12° aralığında gerilim birikiminin arttığını belirtmiştir.

Tablo 5. Matris-Baskı plakası açısının maksimum zımba kuvvetine etkisi (R4, BPK=5500 N).

Açı (°)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
0	75026,88	88996,32	Yüksek
5	71868,06	87152,04	Orta
10	79873,02	84640,68	Yırtılma
15	82266,66	86426,10	Düşük



Şekil 3. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.

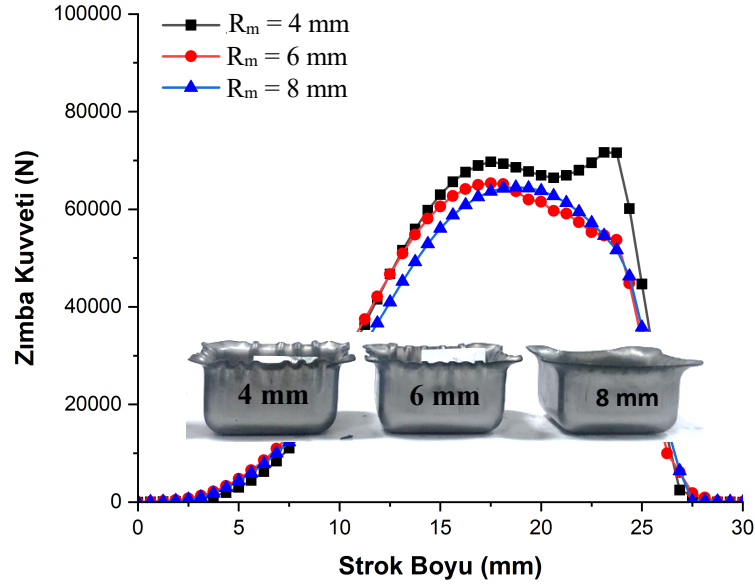
Radyüsün 4 mm'den 8 mm'ye artmasıyla maksimum zımba kuvveti düşmüştür (Şekil 4). 4 mm radyüste 100 mm ilkel parça çapı için 71652,24 N olan kuvvet, 8 mm radyüste 64530,18 N'a düşmüştür (Tablo 6). Ancak radyüsün 8 mm'ye çıkarılması, ondülasyonlarda beklenmeyen bir artışa neden olmuştur. Bu durum, aşırı radyüsün malzeme akışını engelleyerek lokal gerilim birikimine yol açtığını göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar genellikle radyüs artışının ondülasyonları azalttığını belirtse de [16], bu çalışma kritik bir radyüs eşiğinin varlığına işaret etmektedir. Bu bulgu, radyüs büyüdükçe malzeme akışının kolaylaşması ve gerilim dağılımının homojenleşmesiyle açıklanabilir [11]. Ancak 4 mm radyüste ondülasyonların artması, malzeme akış dinamiklerinin radyüs boyutuna bağlı olarak değişebileceğini ve optimum radyüs değerinin proses parametrelerine göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, 6 mm radyüste hem kuvvet hem de ondülasyon açısından dengeli bir performans gözlemlenmiştir.

BPK'nın 5500 N'dan 10400 N'a artmasıyla maksimum zımba kuvveti önce artmış, ardından azalmıştır (Şekil 5). İkel parça çapının 100 mm olması, BPK=5500 N'da 74968,02 N olan kuvvet, BPK=7950 N'da 76476,9 N'a yükselmiş, BPK=10400 N'da ise 71632,62 N'a düşmüştür (Tablo 7).

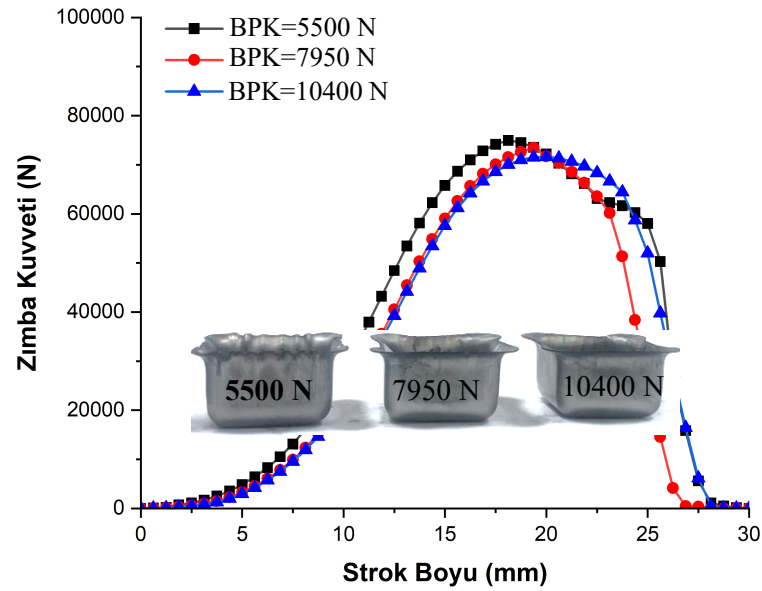
BPK artışı, ondülasyonları belirgin şekilde azaltmıştır. BPK=5500 N'da yüksek ondülasyon gözlemlenirken, BPK=10400 N'da bu kusurlar minimum seviyeye inmiştir (Şekil 5). Ancak BPK=10400 N'da kuvvetin düşmesi, malzemenin aşırı sıkıştırılmasının plastik deformasyonu sınırladığını göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar, BPK'nın malzeme sıkışmasını kontrol etmedeki kritik rolünü vurgulamaktadır [17].

Tablo 6. Matris radyüsünün maksimum zımba kuvvetine etkisi (15° Açı, BPK=7950 N).

Radyüs (mm)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
4	71652,24	77518,62	Yüksek
6	65314,98	76851,54	Azalmış
8	64530,18	74026,26	Düşük



Şekil 4. 15° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.



Şekil 5. 5° ve radyüs 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.

Tablo 7. BPK'nın maksimum zımba kuvvetine etkisi (R 6, 5° Açı).

BPK (N)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
5500	74968,02	84366,00	Yüksek
7950	76476,90	86798,88	Orta
10400	71632,62	81795,78	Düşük

Bu sonuçlar, [17]'de vurgulandığı gibi BPK'nın malzeme sıkışmasını kontrol etmedeki kritik rolünü doğrulamaktadır. BPK=7950 N'da kuvvetin maksimum seviyeye ulaşması, [12] nolu referanstaki optimum BPK değerlerinin bizim çalışmamızda elde ettiğimiz ideal BPK değeri olan 7950 N ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ancak BPK=10400 N'da kuvvetin düşmesi, aşırı sıkıştırmanın deformasyon kapasitesini azalttığını gösterir. Bu durum, [11]'deki "plastik deformasyon sertleşmesi" hipotezini desteklemektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, özellikle matris açısı ve BPK ilişkisi konusunda [15] ve [11] nolu referanslar ile uyumludur. Ancak, 10° açıdaki yırtılmalar, [17]'de belirtilen kritik gerilim eşliğinin altında kalmak için daha yüksek BPK gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, radyüs artışının ondülasyonları azaltması, kaynak [12]'deki artan radyüs değerleri ile ondülasyonların azaldığı bulgusu bizim sonuçlarımızla örtüşmektedir.

3.3. İlkel Parça Boyutlarının Numune Deformasyonlarına Olan Etkisi

Derin çekme işleminde oluşan temel hatalar; buruşma, yırtılma, kulaklanma incelme, BPK'den oluşan çatlak, dalgalanma (pot), girinti izi, matris izi, sac malzeme kaynaklı hatalar olarak söylenebilir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu tespit edilen hatalar ise; çekilen numunelerin üst kısımlarında ve yan yüzeylerinde oluşan buruşma, aynı bölgelerde oluşan yırtılma, numune taban yüzeyine paralel olarak yırtılma ve çatlak, taban yüzeyinde bulunan köşelerde incelme olarak gözlemlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ilkel parça çapı büyüdükçe hidrolik pres tarafından zımba ile aktarılan kuvvetin arttığı ölçülmüştür. Aynı zamanda ilkel parça çapının büyümesi ve uygulanan kuvvetin artması ile numuneler üzerindeki deformasyonların olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu deformasyonu azaltıcı parametreler kullanılmıştır. Örneğin Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde BPK'nın artması numunelerin üst kısımlarında oluşan ondülasyonu azalttığı gözlemlenmiştir. Ancak BPK'nın ve ilkel parça çapının aynı anda artırıldığı durumlarda numunelerin taban yüzeyine paralel olarak yırtılmalar gözlemlenmiştir. BPK'nın ve ilkel parça çapının arttığı durumda oluşan deformasyonlar ve taban yüzeyine paralel olarak oluşan yırtılmalar Şekil 6'da verilmiştir.

**Şekil 6.** 100 mm ve 105 mm ilkel parça çapında BPK'nın değişimi ile oluşan deformasyonlar.

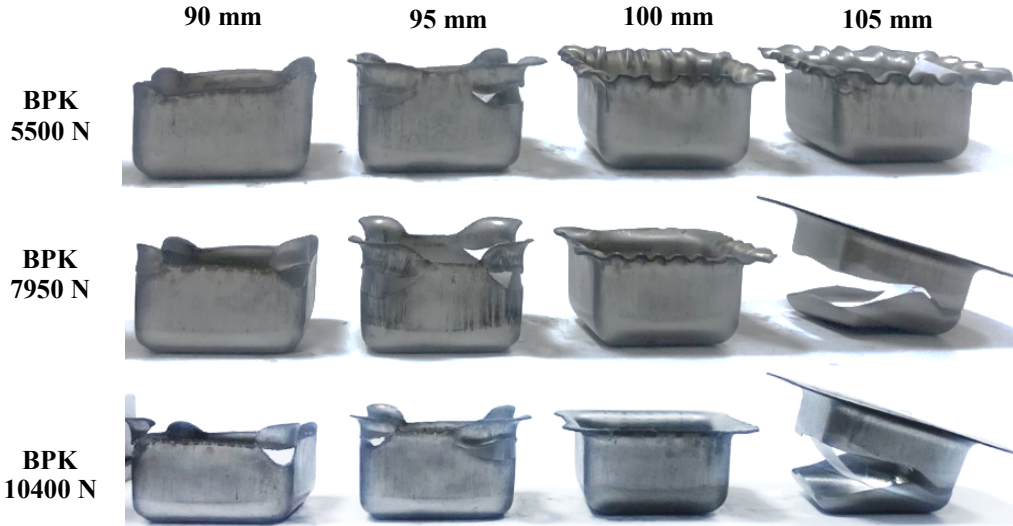
Şekil 6'da aynı şartlarda oluşturulan deney numuneleri incelendiğinde BPK'nın artması ile 100 mm ilkel parça çapındaki değişimler BPK'nın artması ile numunelerdeki üst kısımlarda oluşan ondülasyonlar azalmıştır. 105 mm ilkel parça çapındaki BPK'nın artması ile numunelerin üst kısımlarındaki ondülasyonlar azalmıştır.

BPK'nın 5500 N olduğu durumda üst köşelerde yırtılma ve aynı zamanda tabana paralel şekilde yırtılma görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu oluşan bazı deformasyonlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Deneyel çalışmalar sonucunda oluşan çeşitli deformasyonlar ve hatalar.

Yapılan deneyel çalışmalarda ilkel parça boyutlarının etkinliğini araştırmak amacıyla matris-baskı plakası açısının 0° , matris radyüsünün 4 mm, BPK'nın değiştirilerek hazırlanan deney düzeneğinde 90 mm ve 95 mm ilkel parça çapıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait olan numuneler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. İkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi.

Şekil 8'de verilen numuneler incelendiğinde BPK'nın 5500 N olduğu durumda oluşturulan numuneler ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar artmış ve buna bağlı olarak ondülasyonlar artmıştır. 95 mm ilkel parça çapında ise yırtılmalar oluşmuştur. BPK'nın 7950 N olduğu durumda ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlarda bir azalma görülmüştür. Bir önceki BPK ile aynı olarak 95 mm ilkel parça çapında yırtılmalar oluşmuş ve 105 mm ilkel parça çapında tabana paralel olarak yırtılma gerçekleşmiştir. 10400 N BPK'nın olduğu durumda ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlar gözlemlenmemiştir. BPK'nın fazla gelmesinden dolayı ilkel parça matris içine akma konusunda zorlanmış 90 mm ve 95 mm ilkel parça çaplarında numunelerin üst köşelerinde yırtılmalar oluşmuştur. 105 mm ilkel parça çapında ise numunenin taban yüzeyine paralel bir yırtılma oluşmuştur.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışma, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sacların kare kap derin çekilmesinde matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK parametrelerinin şekillendirilebilirlik ve kusur oluşumu üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Elde edilen bulgulara göre:

Matris-Baskı Plakası Açısı: 0° ile 15° arasında artan açı, maksimum zımba kuvvetinde genel bir azalmaya neden olmuştur. Ancak 10° açıda kritik gerilim birikimi sonucu yırtılmalar gözlemlenmiştir (Şekil 3). Literatürle uyumlu şekilde [13], 5° - 10° aralığı dengeli bir performans sağlamıştır.

Matris Radyüsü: Radyüsün 4 mm'den 8 mm'ye artırılması, ondülasyonları azaltmış ancak 8 mm'de lokal gerilim artışına bağlı beklenmedik kusurlara yol açmıştır. Optimum radyüs değeri 6 mm olarak belirlenmiştir.

Baskı Plakası Kuvveti (BPK): BPK'nın 5500 N'dan 10400 N'a artırılması, ondülasyonları önemli ölçüde azaltmış ancak 10400 N'da plastik deformasyon kapasitesini sınırlamıştır (Tablo 7). BPK=7950 N, kuvvet ve kusur dengesi açısından optimal bulunmuştur.

Çalışma, parametrelerin etkileşiminin şekillendirilebilirliği nasıl belirlediğini ortaya koyarak endüstriyel süreçlerde verimlilik ve kalite artışına yönelik kritik veriler sunmaktadır. Özellikle 6 mm matris radyüsü, 5° - 10° açı ve 7950 N BPK kombinasyonunun kusur minimizasyonu ve yüksek üretim verimi sağladığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma ikinci yazarın “Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi Ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Araştırılması” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.21.30 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. E.Ü. fikir sahibi, U.Ö. deneyleri gerçekleştirdi, E.Ü. ve U.Ö. sonuçları yorumladı, E.Ü. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Kayhan E, Kaftanoğlu B. Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Derin Çekme Oranlarının Geliştirilmesi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar. Mak Tas İmlt Derg 2016;14(2):77-87.
- [2] Luo L, Wei D, Zu G, Jiang Z. Influence of blank holder-die gap on micro-deep drawing of SUS304 cups. Int J Mech Sci 2021;191(April 2020):106065.
- [3] Dal SR. Analysis of Wrinkling in Deep Drawing Processes. MSc, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.
- [4] Gallée S, Pilvin P. Deep drawing simulation of a metastable austenitic stainless steel using a two-phase model. J Mater Process Technol 2010;210(6-7):835-843.
- [5] Collins DA, Carter EL, Lach TG, Byun TS. A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels. Nucl Eng Technol 2022;54(2):709-731.
- [6] Zhang H, Li C, Xu M, et al. The fatigue performance evaluation of additively manufactured 304L austenitic stainless steels. Mater Sci Eng A 2021;802(October 2020):140640.
- [7] Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması. BAÜ FBE Derg 2008;10(2):3-12.
- [8] Sener B, Kurtaran H. Optimization of process parameters for rectangular cup deep drawing by the Taguchi method and genetic algorithm. Mater Test 2022;58(3):238-245.
- [9] Ballıkaya H, Savaş V, Özay Ç. Investigation of Sheet Thickness and Punch Force in Die Surface Angled Hydro-mechanical Deep Drawing Method. El-Cezeri. 2023;10(3):475-491.
- [10] Ballıkaya H, Savas V, Ozay C. The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method. Int J Adv Manuf Technol 2020;106(1-2):791-801.
- [11] Özek C, Ünal E. The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups. GUMMFD. 2012;27(3):615-622.
- [12] Özek C, Ünal E. Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups. Mater Manuf Processes 2011;26(9):1117-1125.
- [13] Özek C, Bal M. The effect of die/blank holder and punch radiuses on limit drawing ratio in angular deep-drawing dies. Int J Adv Manuf Technol 2009;40(11-12):1077-1083.
- [14] Özek C, Taşdemir V. AA 5754-O alaşımının ilik derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması. GUMMFD. 2017;32(1):193-201.
- [15] Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U. Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies. Mater Des 2008;29(5):1043-1050.
- [16] Ünal E, Özek C. A study on the wall thickness in the angular deep drawing process. Mater Test 2017;59(2):178-182.
- [17] Takuda H, Mori K, Masachika T, Yamazaki E, Watanabe Y. Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing. J Mater Process Technol 2003;143-144(1):242-248.