



AISI 304L Paslanmaz çeliğin sıvama parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi

Kemal Yaman^{1*}, Murat Özcan², Zafer Tekiner³

¹Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Savunma Araştırma Geliştirme Enstitüsü, Mamak, Ankara, 06261, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, Ankara, 06560, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06560, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sıvama parametrelerinin tahmin edilmesi
- Kesme parametrelerinin iş parçası cidar kalınlığına etkisi
- Sıvanan iş parçasında gerilme ve gerinme dağılımı

Makale Bilgileri

Geliş: 20.01.2016

Kabul: 30.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406802

Anahtar Kelimeler:

Metal sıvama,
sıvama parametreleri,
sonlu elemanlar,
sac şekillendirme

ÖZET

Sıvama operasyonlarının düşük maliyetli ve istenen ölçü tamlığında gerçekleştirilebilmesi için, işleme parametrelerinin önceden tespit edilmesinin çok önemli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, ilerleme hızı, sac malzeme cidar kalınlığı ve devir hızı parametreleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen iş parçası cidar kalınlıklarıyla deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen numune cidar kalınlıkları kıyaslanmıştır. Deneylerde kullanılan geometriler ve malzemeler sayısal olarak modellenmiş ve simufact forming® yazılımı tarafından üç farklı iş mili hızı ve besleme hızı işleme koşullarına göre analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen gerilmeler, gerinmeler ve kalınlık dağılımlarının ilerleme hızı ve devir hızıyla olan ilişkileri incelenmiştir. İlerleme hızının devir hızına oranla iş parçası cidar kalınlığı üzerinde daha belirgin etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıvama kuvvetinin eksenel ve radyal bileşenlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca dayanarak, sayısal analizlerin sıvama işleminde ihtiyaç duyulan başlangıç parametrelerinin ve ortaya çıkacak nihai iş parçası geometrisinin önceden kestiriminde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Determination of the spinning parameters of AISI 304L stainless steel by using finite element method

H I G H L I G H T S

- Prediction of the spinning parameters
- The effect of cutting parameters on workpiece wall thickness
- The stress and strain distribution of the spinning workpiece

Article Info

Received: 20.01.2016

Accepted: 30.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406802

Keywords:

Metal spinning,
spinning parameters,
finite element,
sheet forming

ABSTRACT

It is well known that defining process parameters prior to the metal spinning process is very important due to obtaining accurate results and manufacturing with low cost. In this study, feed rate, material thickness and spindle speed in a spin forming process were investigated both numerically and experimentally. Material thickness results from the FEM analysis and from experimental studies were compared. The geometries and materials used in the experiments were numerically modeled and analyzed by simufact forming® software according to three different spindle speeds and feed rates processing conditions. The relation of stress, strain and wall thickness variation results of the analyses to the process parameters of feed rate and spindle speed were examined. The effect of feed rate was more prominent on wall thickness of workpieces rather than spindle speed. Furthermore, the variation of the axial and radial components of the spinning force over time has been investigated. Results of experiments and analyses were found in good agreement. Therefore, it was clearly shown that numerical analyses can be employed for the prediction of required initial parameters and final shape of workpiece.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: kemal.yaman@tubitak.gov.tr / Tel: +90 312 590 9180

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

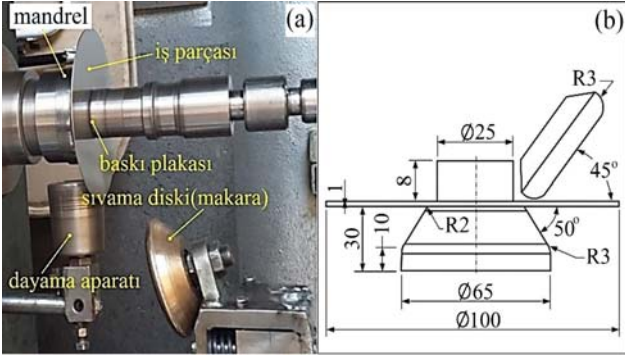
Metal şekillendirme endüstrisinde sıvama yöntemi, yüksek üretim esnekliği, düşük maliyeti, işlem verimliliği ve yüksek parça dayanımı ile ön plana çıkan bir yöntem olmuştur. İnce cidarlı, eksenel simetrikli parçaların üretiminde özellikle de uzay, havacılık ve savunma sanayisinde zaman içinde önemi artan bir imalat yöntemi olmuştur. Sıvama işlemlerinde işlem verimliliğine ve parça kalitesine etki eden çok farklı parametreler vardır. Sıvama işleminin kontrollü olarak yapılabilmesi, sıvama işlemini etkileyen bu parametrelerin doğru ve uygun seçilmesine bağlıdır. Yapılan bu çalışmada amaç, ilerleme ve devir hızının sıvama işlemi üzerine etkilerini deneysel ve sayısal olarak inceleyerek, deneme yanılmaya ihtiyaç duymadan sayısal modellemeyle en uygun işleme parametrelerini ve çıkacak geometriyi önceden tahmin edebilmektir. Zhan vd. [1], sıvama diski ilerleme hızının konik sıvama işlemine etkilerini analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelemiştir. Sıvama elemanları Abaqus® analiz programında modellenmiştir. Modelleme esnasında sıvama diskinin iş parçası üzerindeki en uygun konumunun belirlenmesi için analitik hesaplamalar yapılmıştır. Sıvama operasyonunda birbiriyle simetrik olan çift sıvama diski (ing. roller) kullanmışlardır. İlerleme hızındaki artışın, radyal, eksenel ve teğetsel yöndeki sıvama kuvvetlerini arttırdığını bildirmişlerdir. Farklı ilerleme hızlarında cidar kalınlığı dağılımının benzer olduğunu, duvar kalınlıklarının taban ve flanş (yanak) bölgelerinde en büyük değerlerine ulaştığı bildirilmiştir. Şekil ve ölçü hassasiyetinin ilerleme hızı arttıkça azaldığı da ayrıca belirtilmiştir.

Quigley ve Monaghan [2], Konvansiyonel sıvama işlemini MSC Marc® sonlu elemanlar yazılımıyla analiz etmişlerdir. Analiz yönteminde bölge (domain) ayrıştırma yöntemi ve paralel işleme tekniklerini kullanarak analiz sürelerini kısaltmışlardır. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve yöntemin güvenilirliği ispatlanmıştır. Quigley ve Monaghan [3] yaptıkları bir diğer çalışmada geleneksel sıvama ile malzeme akıtmayla şekillendirmeyi karşılaştırmışlar, sıvamanın birinci pasosunda bazı bölgelerde akmanın meydana geldiğini ve geleneksel sıvama işleminde akıtma ile şekillendirmeye (ing. shear forming) oranla çok daha az plastik şekil değiştirme oluştuğunu açıklamışlardır. Hua vd. [4], tüp sıvama işleminde 3 adet sıvama diski kullanmanın etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmada Hastelloy C tipi alaşımlı boru şekilli bir tüp tercih edilmiştir. İşlem ANSYS® paket programı ile simüle edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak iş parçası ve sıvama diski arasındaki ilişkinin yanı sıra iş parçası ve mandrel arasındaki ilişki de incelenmiştir. Radyal, eksenel ve çevresel gerinme değerleri hesaplanmış, sıvama sırasında tüp yüzeyinde oluşan çatlaklara, çevresel ve eksenel gerinmelerin sebep olduğu iddia edilmiştir. Qian vd. [5], Abaqus/Explicit programında alüminyum alaşımlı sac malzemenin elasto-plastik sıvama analizlerini yapmışlardır. İş parçasında meydana gelen geri esneme oranını sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir.

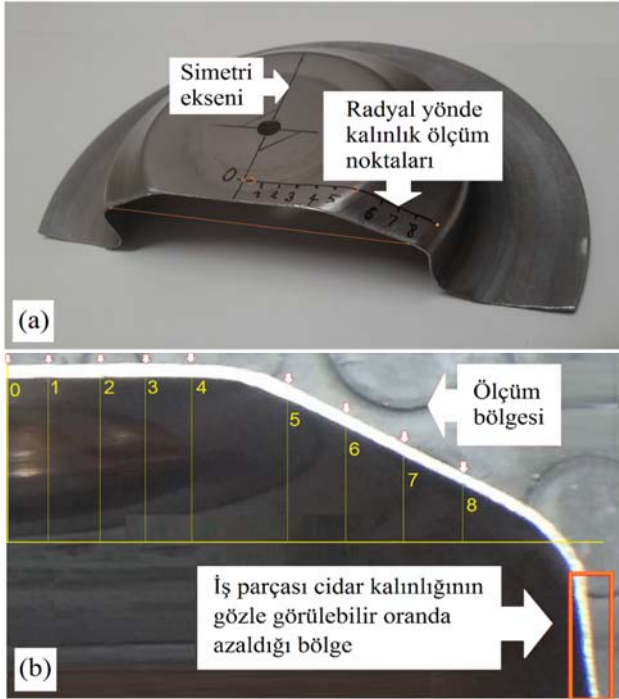
Elastik deformasyonların incelendiği sonlu elemanlar modelinin sadece geri yaylanmayı değil aynı zamanda lokal deformasyon mekanizmalarının da analiz edilmesine öncülük ettiğini ve bu yönde uygun parametrelerin seçilebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca uyabilen ağ (ing. adaptive mesh) teknolojisinin çok daha yakın sonuçlar verdiği açıklanmıştır. Jianguo ve Makoto [6], dairesel alüminyum tüp sıvama işleminde birbirine paralel iki sıvama diski kullanıldığı durumda girintilenme hızının etkilerini CNC kontrollü bir deney düzeneği kurarak deneysel olarak incelemiştir. Sıvama diskinin girintilenme hızı arttırıldığında ve tüp çapı azaltıldığında, gerinme kalınlığı (ing. thickness strain), sıvama kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemişlerdir. Bunun sonucu olarak ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Watson ve Long [7], sıvama işleminde oluşan kırışıklık (ing. wrinkling) sorununu deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Kırışıklığın sıvama diski ile sac malzeme arasında plastik mafsal (ing. hinge) noktası oluşur oluşmaz meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu eğme momentinin büyüklüğü sac malzemenin iç direnç kuvvetlerini aştığı an kırışıklık meydana gelmektedir. Wang vd. [8] kırışıklığın ilerleme hızı ve devir hızına bağlı olduğunu belirtmişler ve iki parametre arasında bir kırışıklık sınırı diyagramı oluşturmuşlardır. Honarpisheh vd. [9] sıvama parametrelerinin kalınlığa olan etkileri incelemek için, 1 mm kalınlığında Al 1060 malzemeyi konik sıvamışlardır. İş parçası cidar kalınlığının, mandrel devir hızı ve ilerleme hızı arttıkça azaldığını [10, 11] deneysel ve sayısal olarak göstermişlerdir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

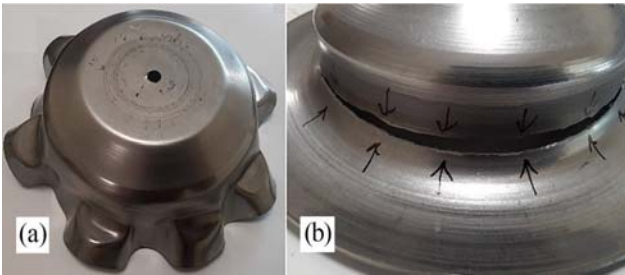
Deneysel çalışmalarda kullanılan deney seti Şekil 1'de, (a) sıvama tezgâhı ve bileşenleri, (b) bu bileşenlere ait ölçüler şematik olarak gösterilmiştir. Deneylerde AISI 304L paslanmaz sac malzemenin yüzey kalitesi, ölçü tamlığı, sac malzeme cidar kalınlığı değişimi, geri esneme, kırışıklık ve sıvanabilirlik gibi farklı parametreler göz önüne alınarak mandrel tasarımı yapılmıştır. Üretilen bileşenlerle, 100/ 300/ 600 [devir/dk] devir hızlarında, 0,8/ 1,6/ 3,2 [mm/s] ilerleme hızlarında toplam 20 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerden 9 adeti merkezlerinden ikiye kesilerek cidar kalınlığı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde rölenin sıvama kalıbıyla yaptığı açı 45° olarak belirlenmiştir (Şekil 1b). Deneysel çalışmalarda kalınlıktaki azalmayı daha belirgin görebilmek için iş parçası çapı 100 mm olarak alınmıştır. Deneysel çalışmalarda iş parçası cidar kalınlıkları ölçümü için numuneler, Şekil 2a'da gösterildiği gibi merkezinden yaklaşık 10 mm mesafede kesilerek hazırlanmıştır. Kalınlık ölçümleri Mitutoyo 209-572 tipi 0,01 mm hassasiyetli kalınlık ölçme cihazıyla Şekil 2b'de gösterildiği gibi iş parçası kesitinden radyal yönde yaklaşık 5 mm aralıklarla işaretlenen ölçüm noktalarından alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları 3. Bölümde sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneylerde ortaya çıkan şekil bozukluklarından dolayı çok pasolu işleme tercih edilmiştir.



Şekil 1. Sıvama deney seti a) sıvama tezgâhı ve bileşenleri b) şematik diyagramı ve ölçüleri
(Spinning test set a) spinning machine and its components b) schematic diagram and measurements)



Şekil 2. Kalınlık ölçümü için kesilen numuneye ait a) genel görünümü b) iş parçası cidar kalınlık değişimi ve kalınlık ölçüm noktaları
(Cutting sample for thickness measurement a) general view b) workpiece thickness variation and thickness measurement points)



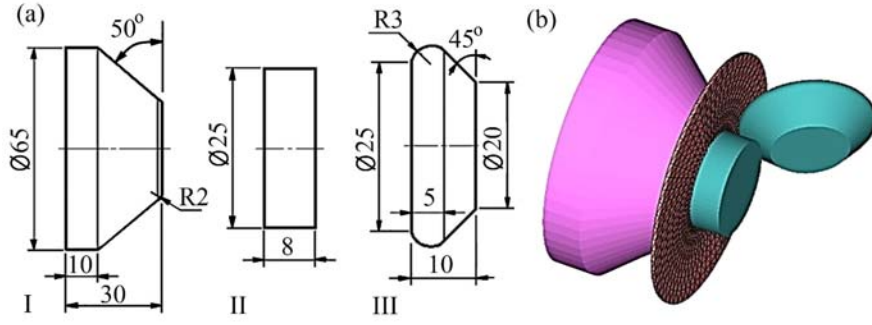
Şekil 3. Sıvama işlemleri sırasında meydana gelen şekil bozuklukları a) kırışıklık b) yırtılma (Shape deformations that occur during spinning are a) wrinkle b) tear)

Tek pasolu ve dayama aparatı olmadan yapılan sıvamalarda kırışıklıklar meydana gelmiştir (Şekil 3a). Yüksek ilerleme ve düşük devir hızlarında ise (300 [dev/dk] devir hızı ve 4,2 [mm/s] ilerleme hızı gibi) malzemede Şekil 3b’de görüldüğü gibi çevresel yırtılmalar meydana gelmiştir. Hayama vd. [12] ilerleme oranı ve iş parçası kalınlığının kırışmayı etkileyen en önemli faktörler olduğunu rapor etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Kleiner vd. [13], kırışmaya temel olarak iş parçası çap ve kalınlığının sebep olduğunu bildirmişlerdir. Zeng vd. [14] ise, sıvanabilirliğin yırtılmanın önceden tahmini ve sıvama cidar kalınlığının kontrolü açısından önemli rolü olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda gerilmenin ve plastik şekil değiştirmenin (gerinmenin) işleme zamanı boyunca arttığını belirtmişlerdir. Ahmed vd. [15] sayısal analiz sonuçlarına göre yırtılmanın olduğu bölgelerin radyal çekme gerilmesinin en büyük olduğu, sıvama diskinin temas ettiği, bölgelerde oluştuğunu bildirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda, iş parçası üzerinde meydana gelen deformasyonların sonlu elemanlar analizleri SIMUFACT FORMING paket programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler sırasıyla, sıvama elemanlarının ve sac malzemenin bilgisayar ortamında geometrilerinin modellenmesi, modelin analiz işleminin yapılacağı paket programa aktarılması, örgü modellerinin oluşturulması ve sac malzeme özelliklerinin atanması işlemleri gerçekleştirilmiştir.

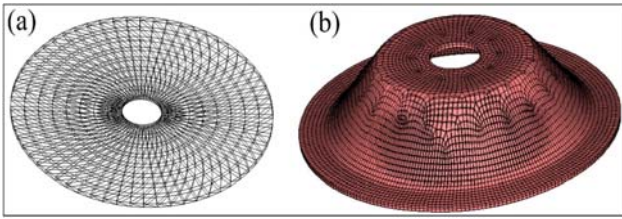
Şekil 4a’da görüldüğü gibi 60 mm çapında ve 1,0 mm kalınlığında AISI 304L paslanmaz çelik sac malzeme dönmekte olan mandrele bir baskı plakası ile sıkıştırılarak dönmesi sağlanmıştır. Şekil 4b’de analiz ortamına aktarılmış elemanlar görülmektedir. Analizler sistem olarak 3,6 GHz hızında, INTEL i7 yonga setli, 8GB hafızalı (RAM) ve 8 çekirdekli bir iş istasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu tip sıvama işlemlerinde aynı anda farklı dönme hareketleri ve ilerleme hızlarından dolayı statik hesaplamalara nazaran daha karmaşık hesaplamalar ortaya çıkmaktadır. Bu da işlem süresini çok uzatmaktadır. SIMUFACT FORMING paket programının paralel işlem (ing. parallel processing) özelliğini desteklemesinden dolayı işleme süreleri büyük oranda azaltılmıştır. Aksi takdirde tek çekirdekli bir sistem ile tek bir analizin süresi dört-altı hafta gibi bir zaman dilimine karşılık gelirken, paralel işleme kabiliyetiyle tek bir analiz ortalama 24 saat gibi bir zaman diliminde tamamlanmıştır.

2.1. Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model)

Mandrel, baskı plakası, disk ve iş parçası (sac) malzeme SolidWorks® katı/yüzey modelleme programında hazırlanmış ve sonlu elemanlar analizi programına “STL” uzantılı yüzey model olarak aktarılmıştır. Sac parçasının modellenmesi esnasında literatürden elde edilen deneysel çalışmalara göre malzeme özellikleri ve diğer fiziksel özellikler programa tanımlanarak analize hazır hale getirilmiştir. Analizler öncesinde, sıvama elemanlarının modellenmesinin ardından, çözümlemede kullanılacak olan sac malzemenin sonlu eleman ağ modeli oluşturulmuştur (Şekil 5).

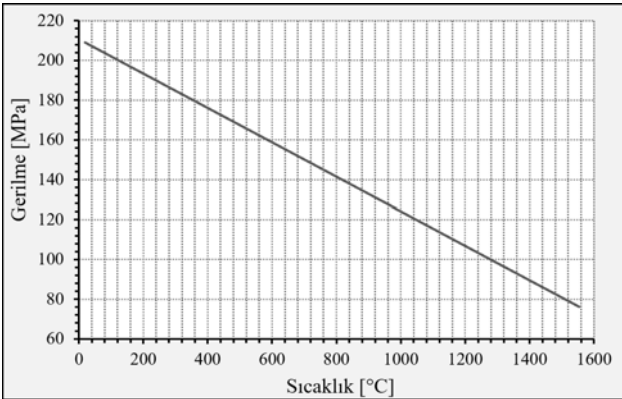


Şekil 4. a) I, mandrel, II, baskı plakası ve III, disk ölçüleri b) elemanların analiz modelleri
(a) I, mandrel, II, plate and III, disc measurements b) analysis models of elements



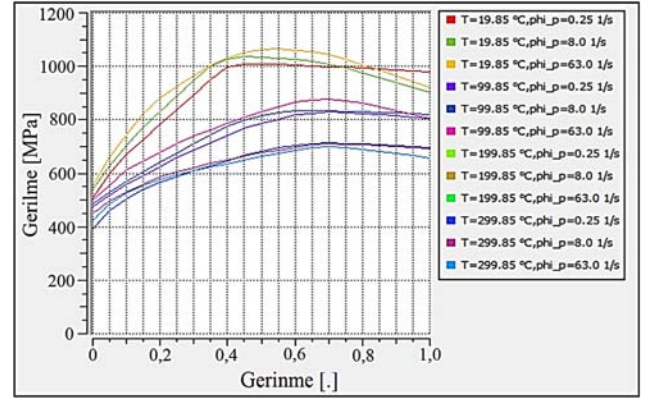
Şekil 5. İş parçasının a) işlenmeden önceki b) işlemeden sonraki sonlu eleman ağ modeli
(FEM Mesh model of workpiece (a) before spinning (b) after spinning)

Malzeme modelleri için gerekli olan elastisite modülleri (E), Poisson oranları (ν) ve yoğunlukları (ρ) simufact malzeme kütüphanesinden [16] alınmıştır. Analizlerde standart değerlerin yanı sıra farklı sıcaklıklarda meydana gelen değişimlerden dolayı deneysel yollarla elde edilmiş deformasyon eğrilerine ihtiyaç vardır bu eğriler yazılımın malzeme kütüphanesinde bulunmaktadır (Şekil 6). Malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri her malzeme için ortam sıcaklığına ve uygulanan yükün hızına bağlı olarak farklılık gösterir. Bu eğriler bakımından SIMUFACT FORMING kütüphanesi, deneysel sonuçlarla elde edilen, oldukça geniş bir veri tabanı sunmaktadır. Bu veri tabanından AISI 304L paslanmaz çelik için elde edilen mekanik özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6'da malzemeye ait gerilme-sıcaklık grafiği de verilmiştir.



Şekil 6. AISI 304L malzemesi için sıcaklığa bağlı gerilme değişim grafiği
(Temperature dependent strain chart for AISI 304L material) [16]

AISI 304L paslanmaz çelik malzemesinin farklı sıcaklarda deneysel olarak elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri de Şekil 7'de gösterilmiştir.

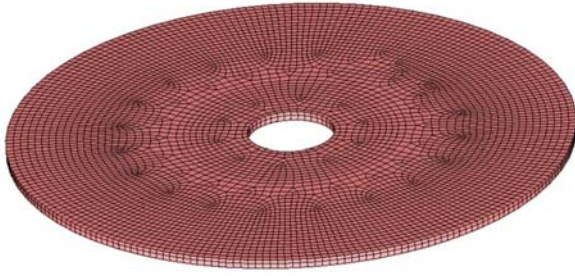


Şekil 7. AISI 304L malzemesine ait farklı sıcaklıklarda gerilme-şekil değiştirme(gerinim) eğrileri
(Stress-strain curves of AISI 304L material at different temperatures) [16]

Sac malzemenin örgü (mesh) modeli her farklı analiz için ayrı ayrı oluşturularak analiz işlemi öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Örgü modelinin eleman tipi olarak sac parçaların analizinde sağladığı hassasiyet bakımından Hexahedral bir yapı kullanılmıştır. Hexahedral şekilli elemanların kullanılması eleman sayısını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu düşüş sonucunda, analiz zamanı ve analiz sonrası işlem zamanı da önemli oranda azalmaktadır. Bu çalışmada, sac malzeme meydana gelecek şekil değiştirmenin incelenmesi esas hedef olduğundan mandrel, sıvama diski ve baskı plakasına ait örgü modelleri zaman kaybını önlemek amacıyla oluşturulmamış, malzemeler sisteme ısı iletkenliği olan rijit malzemeler olarak tanıtılmıştır. Mandrel, sıvama diski ve baskı plakasına ait sıcaklık, sürtünme, ısıl iletkenlik gibi veriler programın malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Analizlerde sabit sürtünme modeli kullanılmıştır. Şekil 8'de sac malzemeye ait örgü modeli gösterilmiştir. Sac malzemelerde cidar kalınlığındaki değişimi görebilmek için cidar kalınlığı boyunca en az üç adet düğüm noktası (ing. node) alınarak sonlu elemanlar ağ ölçüsü (ing. mesh size) ayarlanır. 1 mm cidar kalınlığındaki iş parçası sıvama parametreleri incelendiği için mesh değeri 1/3 mm olarak alınmıştır.

Tablo 1. AISI 304L malzeme özellikleri (Material properties of AISI 304L) [16]

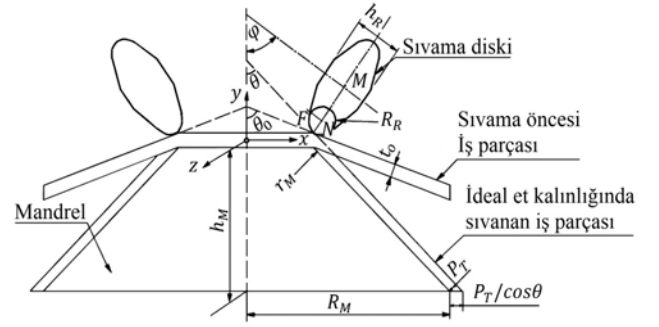
Malzeme mekanik özellikleri		Plastik özellikler	
Elastik özellikler			
Elastisite modülü	193053 [MPa]	En küçük akma gerilmesi (Min. Yield Stress) [S]	90 [MPa]
Poisson oranı	0,28	Akma Sabiti, C (Yield const.)	1451,3
Yoğunluk	8027,2 [kg/m ³]	Deformasyon sertleşmesi oranı, n (Strain hardening ratio)	0,60
Isıl iletkenlik	16,27 [W/m ²]	Isıl genleşme katsayısı (Thermal expansion coefficient)	1,73E-05 [1/K]
Özgül ısı kapasitesi	502 [J]	-	-

**Şekil 8.** Sac malzemenin örgü modeli (Mesh model of blank material)

Benzer ağ modellemesi Quingley ve Monaghan [17] tarafından da yapılmıştır. Awiszus ve Hartel [18] SIMUFACT FORMING programında farklı en-boy oranlarında oluşturdukları ağ örgüsüne göre yaptıkları analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçları karşılaştırmış ve yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Mesh değeri program tarafından içinde çalıştırılan bir optimizasyon algoritmasıyla otomatik olarak, cidar kalınlığındaki değişimi belirleyebilecek bir değerde önerilmektedir. Örgü aralığı elle daha da küçültülüp daha hassas sonuçlar alınabilir fakat bu durumda analiz süresi çok fazla uzamaktadır. Örgü aralığının 0,1 mm belirlenmesi durumunda analiz süresinin 8 hafta gibi uzun bir zamana yayıldığı görülmüştür. Bu durumda en az zamanda en hassas çözüm olarak programın otomatik olarak belirlediği 1/3 mm örgü aralığı ve advancing front mesh tipi [18] (Şekil 8) kullanılmıştır. SIMUFACT FORMING paket programı, sonlu elemanlar analizini MSC. Sfarmc çözücüsünü kullanarak gerçekleştirmektedir. Sfarmc; MSC yazılım firmasının geliştirmiş olduğu doğrusal olmayan (ing. non-linear) bir çözücü olup SIMUFACT FORMING arayüzü ile kullanıcıya sunulmaktadır. Analizlerde iş parçası, dönmekte olan mandrele bir baskı plakası ile sıkıştırılarak beraber dönmeleri sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirildiği sıvama işleminde sıvama diskinin başlangıç konumu, Zhan vd. [1] geliştirmiş olduğu yöntemle göre belirlenmiştir. Yani burada, sıvama diski referans noktası için sıvanmamış iş parçası ve mandrelin montaj pozisyonundan bir konum denklemi oluşturulmuştur. Şekil 9'da görüldüğü gibi tüm sistemin orijin noktası silindirik iş parçasının orta noktası olarak belirlenmiştir. İş parçası (ing. blank) cidar kalınlığı t_0 , sıvama diski (ing. roller), uç radyüsü R_R , mandrel büyük çapı

R_M , Mandrel kalınlığı h_M , yarım koni açısı θ_0 olup, θ mandrelin yarım koni açısı ve φ , sıvama diskinin eğiklik açısı olarak belirlenmiştir. Sinüs kuralına göre sapma oranı (Δ) göz önünde bulundurularak iş parçasının bükülmüş kısmının ideal kalınlığı Eş. 1 ile ifade edilebilir [1]:

$$P_T = \frac{t_0 \sin \theta}{\sin[(\theta_0)(1+\Delta)]} \quad (1)$$

**Şekil 9.** Sıvama diski başlangıç pozisyonu ve sıvama eksen takımı

(Roller disk starting position and coordinate axes) [1]

Şekil 9'da gösterildiği gibi iş parçası sıvama başlangıç noktası ve mandrelin dış yüzeylerinin kesişim noktasının koordinatları için (F) harfini kullandıysa F'nin orijin noktasına göre x ve y düzlemindeki koordinatları (F_x , F_y), sırasıyla aşağıdaki Eş. 2 ve Eş. 3 ile ifade edilebilir [1].

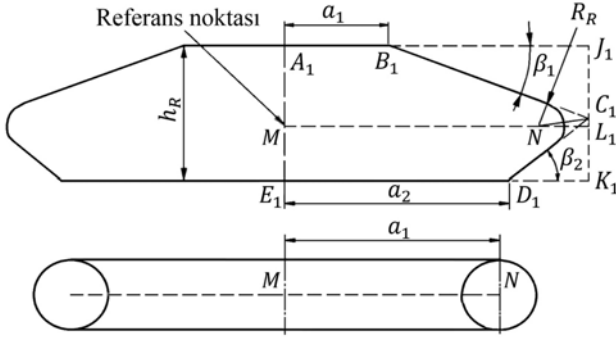
$$F_x = R_M + \frac{\Delta t_0 \sin \theta}{\sin(\theta_0 - \theta)} - h_M \tan \theta \quad (2)$$

$$F_y = \frac{t_0}{2 \sin \theta_0} - \frac{\Delta t_0 \sin \theta \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 - \theta)} \quad (3)$$

Genellikle sıvama işlemlerinde Şekil 10'da gösterilen tipte sıvama diskleri kullanılır. Sıvama diskinin uç radyüsünün koordinatları için (N) harfinin kullanıldığı varsayılırsa N'nin orijin noktasına göre X ve Y düzlemindeki koordinatları (N_x , N_y) aşağıda Eş. 4 ve Eş. 5 ile ifade edilebilir [1].

$$N_x = F_x + R_R \frac{\cos(\theta_0 + \theta)/2}{\cos(\theta_0 - \theta)/2} \quad (4)$$

$$N_y = F_y + R_R \frac{\sin(\theta_0 + \theta)/2}{\cos(\theta_0 - \theta)/2} \quad (5)$$



Şekil 10. Tipik bir sıvama diski ve ölçüleri
(Nomenclature of a spinning disc) [1]

Şekil 8’de gösterildiği gibi Sıvama diski uç radyüsü (N) ve Sıvama diski referans noktası (M) arasındaki mesafeyi hesaplamak için Eş. 6 ve Eş. 7 kullanılmıştır [1].

$$MN = \frac{h_R + a_1 \tan \beta_1 + a_2 \tan \beta_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} - \frac{R_R \cos((\beta_2 - \beta_1)/2)}{\sin((\beta_1 + \beta_2)/2)} \quad (6)$$

$$MN = \alpha_1 \quad (7)$$

Sıvama diskinin referans noktasını (M) harfiyle ifade edecek olursak M’nin orijin noktasına göre X ve Y düzlemindeki koordinatları (Mx, My) Eş. 8 ve Eş. 9 olarak aşağıda ifade edilmiştir [1].

$$M_x = N_x + MN \cos \varphi \quad (8)$$

$$M_y = N_y + MN \sin \varphi \quad (9)$$

Konum koordinatları yukarıdaki denklemler yardımıyla belirlendikten sonra işleminde kullanılacak malzemeler ve sınır şartları tamamlanmış olmaktadır. Üç eleman tipinde de kullanılan malzeme ve sınır şartlarının genel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Üç eleman tipinde de kullanılan malzeme ve sınır şartlarına ait genel özellikler

(General properties of materials and boundary conditions used in three element types)

Parametre	Değeri
Tipi	Rijit malzeme
Malzemesi	H-13
Sürtünme katsayısı	0,20
Başlangıç sıcaklığı	20,0 [°C]
Ortam ısı transfer katsayısı	50,0 [W/(m ² ·K)]
İş parçası ısı transfer katsayısı	20000,0 [W/(m ² ·K)]

Devir hızının etkisi hariç diğer parametrelerin incelenmesinde mandrel devir hızı sabit, 100 [dev/dk] olarak belirlenmiştir. Baskı plakası sac malzemeyi mandrel üzerine 20 [kN] baskı kuvveti ile sıkıştırmaktadır. Sıvama diski ilerleme hızı etkisi hariç diğer parametrelerin incelenmesinde 1,6 [mm/s] olarak belirlenmiştir. Sıvama diskinin uç yarıçapı ise diğer parametrelerde 3,0 [mm] olarak belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Sıvama parametreleri olarak, 100, 300 ve 600 [dev/dk] olmak üzere üç farklı devir hızı ve 0,8 mm/s, 1,6 mm/s ve 3,2 mm/s olmak üzere üç farklı ilerleme hızı değerleri hem deneysel çalışmalarda hem de benzeşim için sayısal analizlerde kullanılmıştır. Analiz çalışmaları sonucunda parça üzerindeki gerilme (ing. effective stress) ve gerinme (ing. effective strain) dağılımları elde edilmiştir. Benzer şekilde, parça üzerindeki iş parçası kalınlık değişiminin radyal yöndeki mesafe (yarıçap) boyunca değişimi de incelenmiş, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen cidar kalınlıkları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3’de 100, 300, 600 devir hızı ve 0,8/ 1,6/ 3,2 ilerleme hızı işleme parametrelerinde, deneysel olarak elde edilmiş, iş parçası ortalama cidar kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 3. Deneyler sonucunda elde edilen iş parçası ortalama cidar kalınlıkları

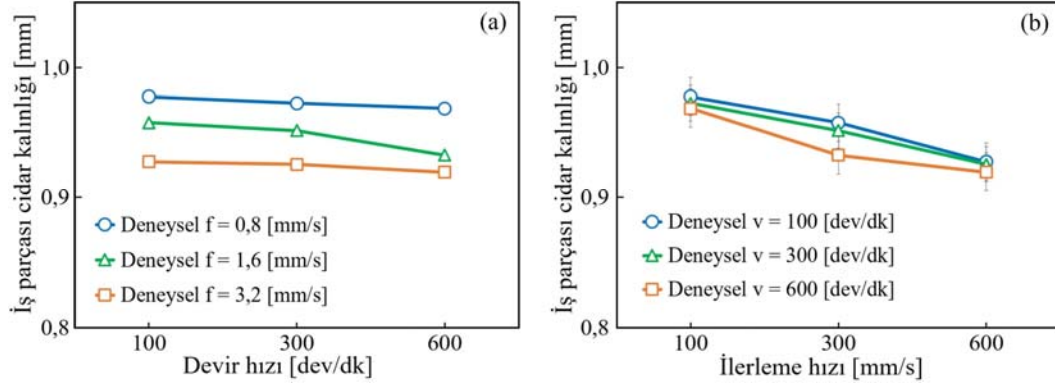
(The workpiece average wall thicknesses obtained as a result of the tests)

İlerleme hızı, <i>f</i> [mm/s]	Devir hızı, ω [dev/dk]		
	100	300	600
0,8	0,978	0,973	0,969
1,6	0,958	0,952	0,933
3,2	0,928	0,926	0,920

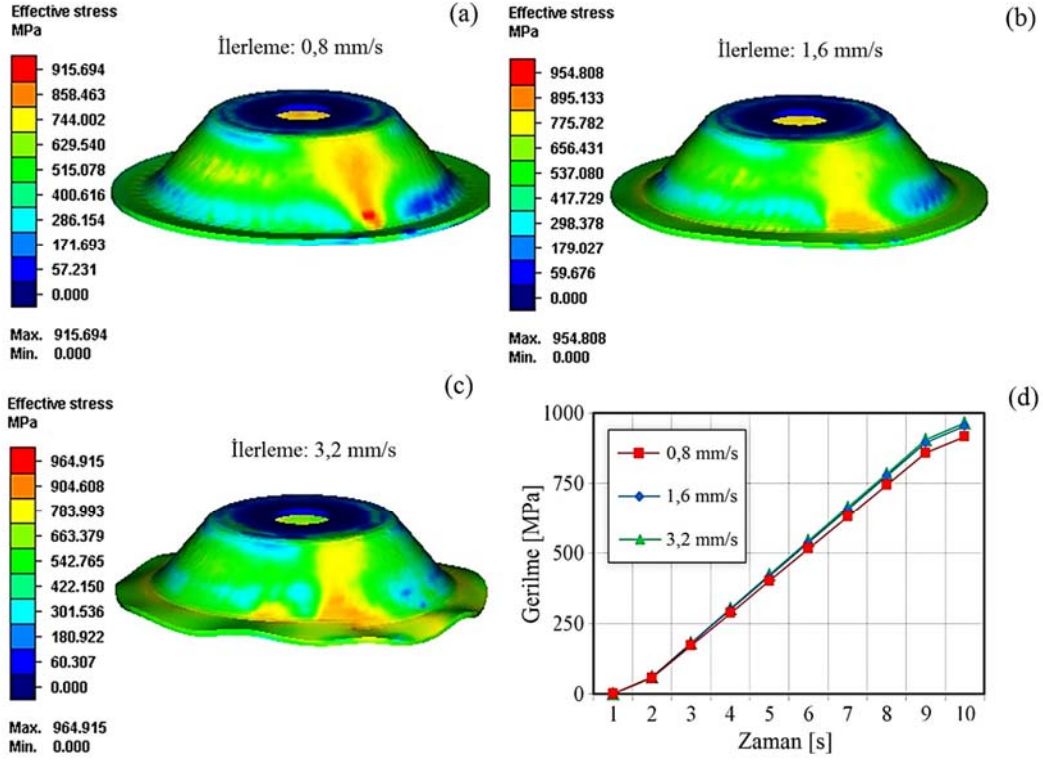
Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara bakıldığında, sabit ilerleme hızı altında devir hızı arttıkça iş parçası cidar kalınlıklarında çok küçük oranlarda azalma olmakla birlikte genel itibariyle yatay bir seyir izlediği gözlemlenmiştir (Şekil 11a). Öte yandan, sabit devir hızları altında ilerleme hızı arttıkça iş parçası cidar kalınlıklarında azalmaların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 11b). Buradan hareketle, iş parçası cidar kalınlıklarının ilerleme hızıyla yaklaşık doğru orantılı olarak azaldığı ancak devir hızından aynı oranda etkilenmediği söylenebilir. Literatürde benzer sonuçlar [9-11] çalışmalarında görülmektedir.

3.2. Sonlu Elemanlar Analizi (İlerleme Hızının Etkisi, *f*) (Finite Element Analysis (The Effect of Feed Rate, *f*))

Devir hızı sabit 300 [dev/dk] alınarak ilerleme değerleri 0,8/1,6/3,2 [mm/s] olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 12 ve Şekil 13’de gösterilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13 incelendiğinde sıvama sonrası iş parçasında oluşan en büyük ve en küçük değerler gösterilmiştir. İş parçasında oluşan en büyük gerilme ve gerinim bölgeleri dağılımı aynı zamanda iş parçası üzerinde oluşan gerilme yığılımlarını da göstermektedir. Şekil 12 ve Şekil 13 beraber incelendiğinde; yüzey gerilme-gerilme çapraz karşılaştırması göz önüne alındığında, parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde 0,8 [mm/s] ilerleme hızında 629 [MPa] (Şekil 12a), 1,6 [mm/s] ilerleme hızında 656 [MPa] (Şekil 12b) ve 3,2 [mm/s] ilerleme hızında 663 [MPa] (Şekil 12c) olarak görülmektedir. Bu durumda ilerleme hızı arttıkça iş parçası yüzeyindeki gerilmelerin arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 11. İş parçası cidar kalınlığının a) devir hızıyla ve b) ilerleme hızıyla değişimi (Workpiece wall thickness variation with a) spindle speed and b) feed rate)



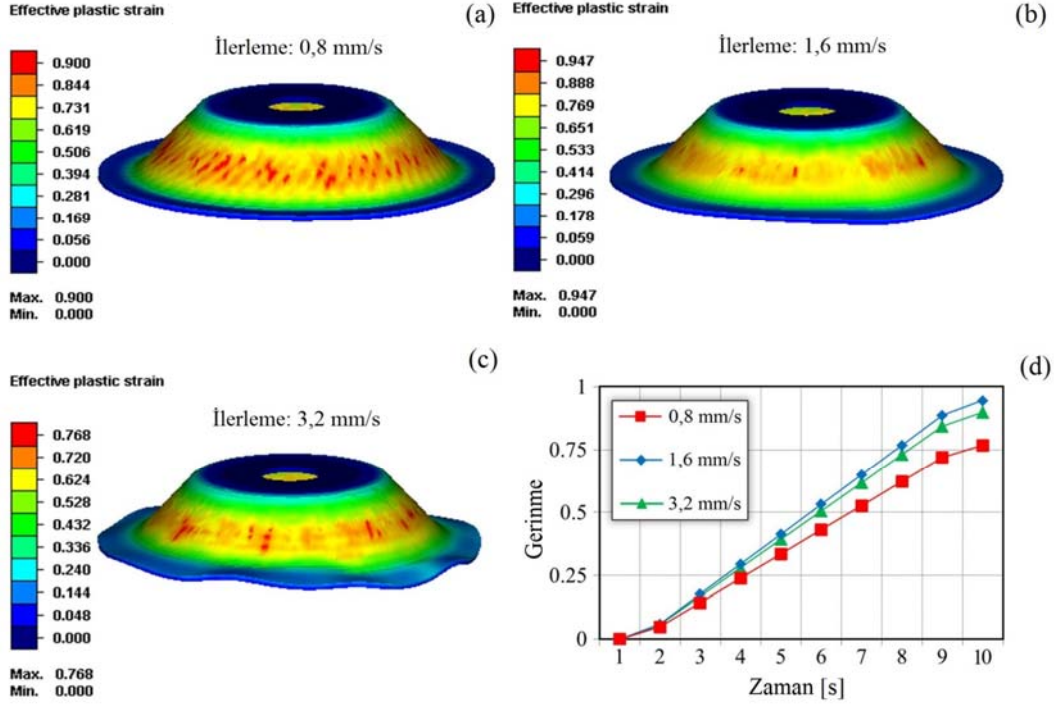
Şekil 12. a) 0,8 b) 1,6 c) 3,2 [mm/s] ilerleme hızlarında oluşan gerilme dağılımı d) gerilme-zaman ilişkisi (The stress distribution at feed rates of a) 0,8 b) 1,6 c) 3,2 [mm/s] d) stress-time relation)

Oluşan en büyük gerilme ise sıvama diskinin parça yüzeyine temas bölgesinde meydana gelmektedir. Şekil 13'deki yüzey gerinim değerleri incelendiğinde birim alandaki en büyük uzamanın en fazla 3,2 mm/s ilerleme hızında meydana geldiği görülmektedir (Şekil 13c). Gerinmenin zamana göre değişimi (Şekil 13d) gösterilmiştir. İlerleme hızındaki artışın iş parçası kenarında kırışıklıklara sebep olduğu da ayrıca görülmektedir. Şekil 14'de değişik ilerleme hızlarında sac malzeme üzerindeki cidar kalınlığı değişimleri görülmektedir. Şekil 14 incelendiğinde; ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak malzemelerdeki cidar kalınlığının azaldığı görülmektedir. Bir sıvama işleminde sıvama parçasının cidar kalınlığına göre akma sınırına erişip erişmediği iş parçasının

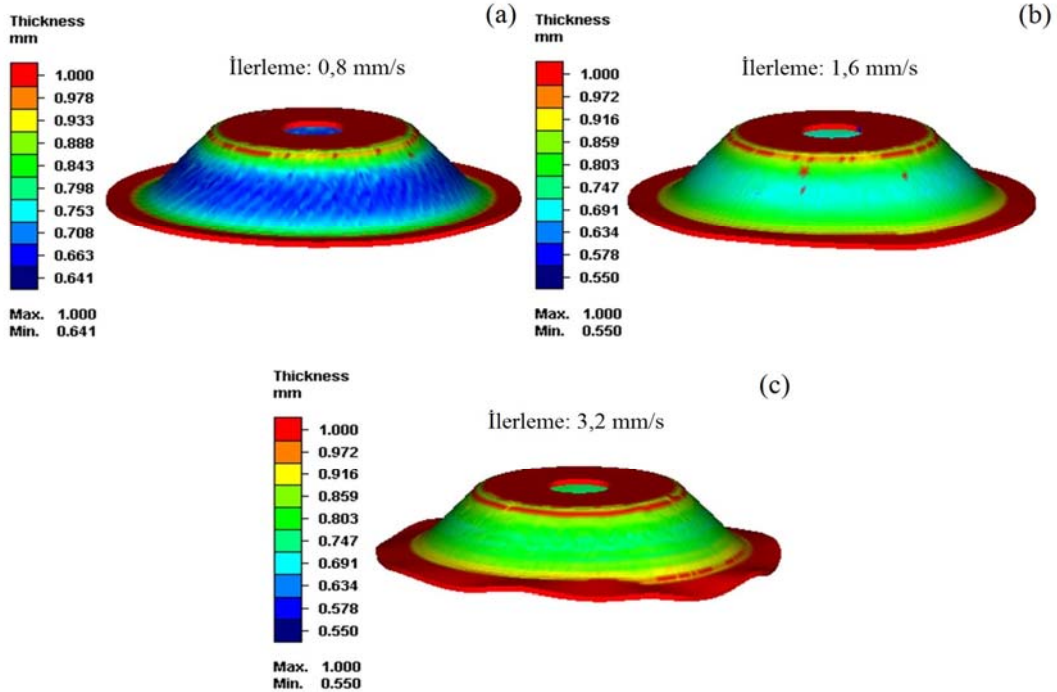
sıvanmadan önceki cidar kalınlığı, sıvama açısının sinüsü ile çarpılarak pratik olarak Eş. 10 ile hesaplanabilir [24].

$$t=t_0 \sin \alpha = 1 \times \sin 60^\circ = 0,86 \text{ mm} \quad (10)$$

Yapılan hesaba göre analiz sürecinde iş parçasının plastik deformasyon sonrası kalınlığı 0,86 mm'dir. Bu değer akma sınırının başladığı en büyük noktayı ifade etmektedir. Sac malzemeleri sıvama işleminde cidar kalınlığındaki azalmanın %60 oranını aşması durumunda ürün kalitesi ve parçanın cidar kalınlığının, nihai kullanımdaki kuvvetleri karşılaması açısından, tehlike sınırına yaklaştığını belirtir. Yani 1 mm kalınlığında bir parça için güvenli bölge olarak



Şekil 13. a) 0,8 b) 1,6 c) 3,2 [mm/s] ilerleme hızlarında oluşan gerinme dağılımı ve (d) gerinme-zaman ilişkisi
(The strain distribution at feed rates of (a) 0,8 (b) 1,6 (c) 3,2 [mm/s] and (d) strain-time relation)



Şekil 14. İş parçasında a) 0,8 b) 1,6 ve c) 3,2 [mm/s] ilerleme hızlarında meydana gelen kalınlık dağılımları
(The thickness distribution of blank at feed rates of (a) 0,8 (b) 1,6 and (c) 3,2 [mm/s])

düşünülebilecek yerler 0,60 mm kalınlığının üzerindeki bölgelerdir. Şekil 14 incelendiğinde hemen hemen tüm

bölgelerin 0,60 mm kalınlığın üzerinde olduğu görülmektedir.

3.3. Sonlu Elemanlar Analizi (Devir Hızının Etkisi, ω) (Finite Element Analysis (The Effect Of Spindle Speed, ω))

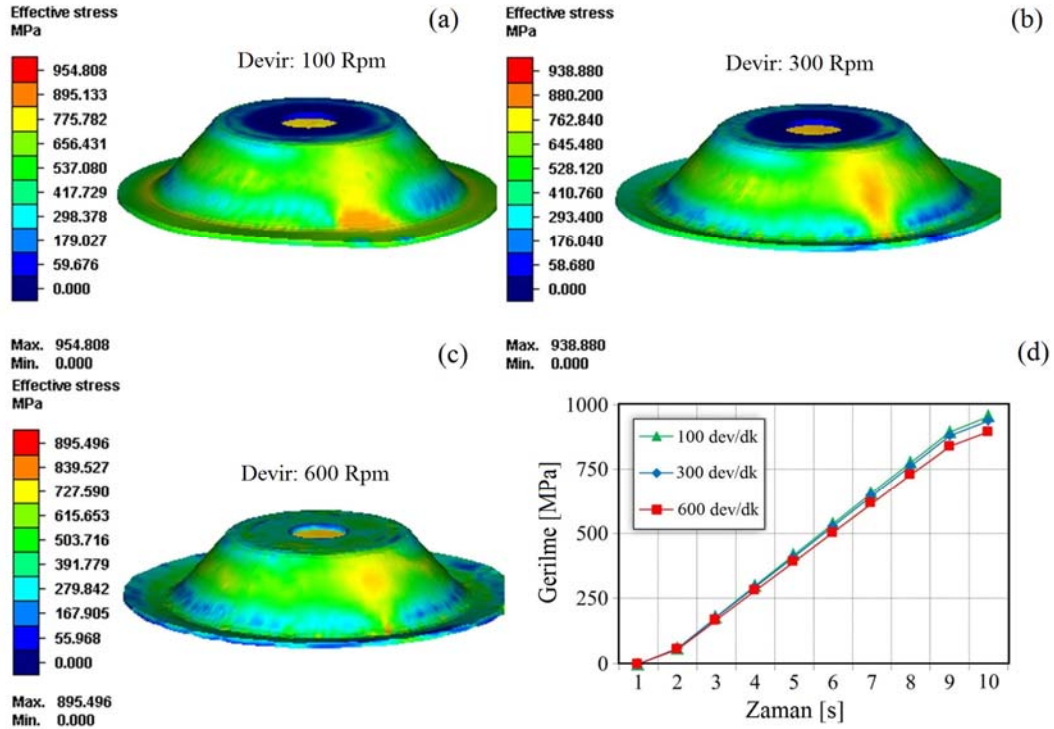
Devir hızının etkilerini belirlemek amacıyla 100, 300 ve 600 [dev/dk] olmak üzere üç farklı devirde analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda sac malzeme üzerindeki gerilmeler, gerinimler, cidar kalınlığı değişimi incelenmiştir. Analiz süresince sabit tutulan değerler Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz-veri tablosu
(Analysis-data table of the parameters affecting the spinning operation)

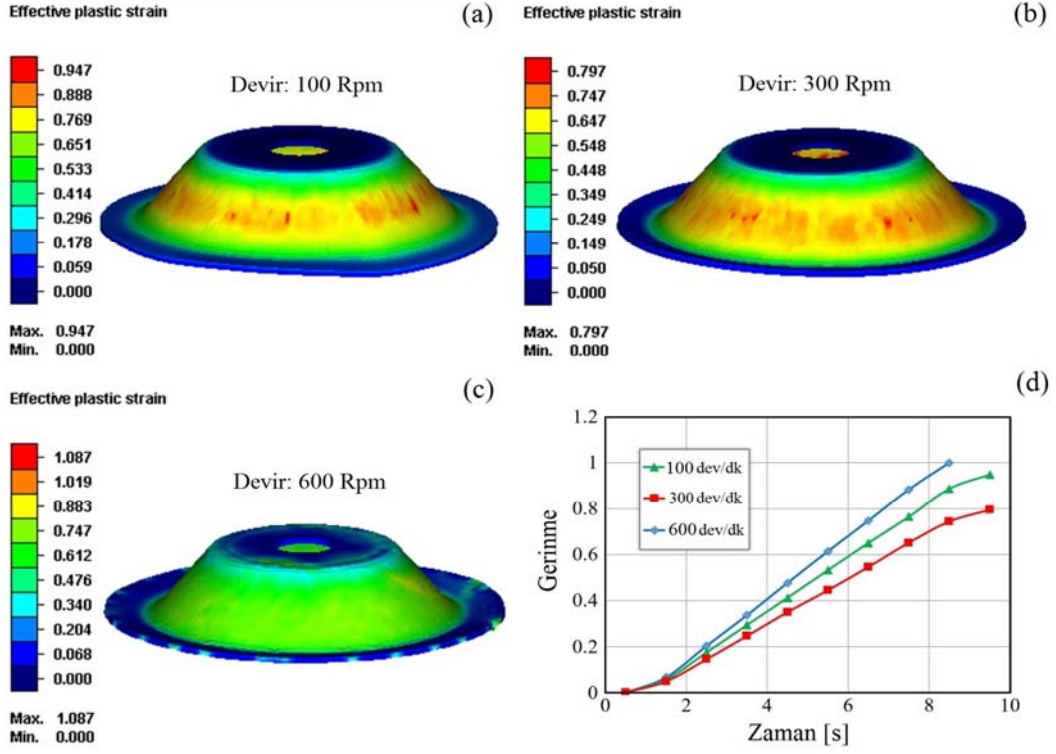
Parametre	Değeri
İş parçası başlangıç çapı	60,0 [mm]
Sac kalınlığı	1,00 [mm]
İlerleme hızı	1,60 [mm/s]
Ortam sıcaklığı	25,0 [°C]
Ortam ısı transfer katsayısı	50,0 [W/(m ² .K)]
Meş aralığı	1/3 [mm]

Şekil 15 ve Şekil 16'da değişik devir hızlarında sac malzeme üzerinde oluşan yüzey gerilme ve yüzey gerinim dağılımı görülmektedir. Şekil 15 ve Şekil 16 beraber incelendiğinde, yüzey gerilme-gerilme çapraz karşılaştırması göz önüne alındığında Şekil 15'de devir hızının 100 [dev/dk] olması durumunda parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde gerilmeler 537-656 [MPa] (Şekil 15a), 300 [dev/dk] olması durumunda 526-645 [MPa] (Şekil 15b), 600 [dev/dk] olması durumunda 503-615 [MPa] (Şekil 15c) olarak

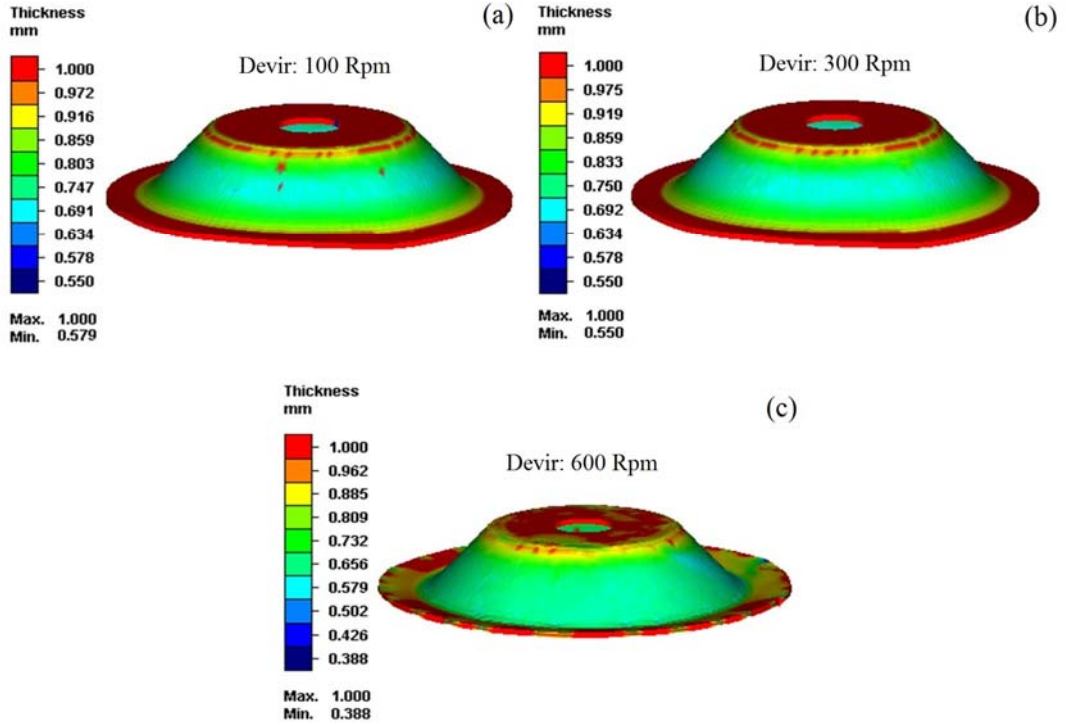
görülmektedir. Buna göre devir hızı arttıkça yüzey gerilme değerleri azalmıştır. Sonuç olarak, sabit ilerleme hızı altında uygulanan devir hızlarının ilerleme hızına oranla daha düşük kaldığı düşünülebilir. Şekil 16'da yüzey gerinim değerleri incelendiğinde birim alandaki en büyük uzamanın yüzeydeki hâkim olan renk dağılımına göre en büyük devir hızı 600 [dev/dk] olan parçada meydana geldiği görülmektedir (Şekil 16a). Şekil 17'de ise, değişik devir hızlarında sac malzeme üzerindeki cidar kalınlığı değişimleri görülmektedir. Şekil 17 incelendiğinde devir hızındaki artışa bağlı olarak sac malzeme cidar kalınlığının azaldığı görülmektedir. 100 [dev/dk] ve 300 [dev/dk] hızlarda parça yüzeyindeki hâkim renkte olan bölgelerde en küçük cidar kalınlığı yaklaşık 0,7-0,9 mm olarak görülmektedir (Şekil 17a-b). Sac malzemeleri sıvama işleminde cidar kalınlığındaki azalmanın %60'oranını aşması durumunda tehlike sınırı aşılmış olmaktadır. Bu değerler 0,75-0,90 mm arasında olduğundan güvenilir bölgededir. 600 [dev/dk] hızda (Şekil 17c) görülen 0,388 mm'lik cidar kalınlığı değeri sıvama bölgesinde olmayıp, mandrelin sac malzeme ile temas noktasındaki kesmeden oluşmaktadır. Bu değerden de o bölgede bir yırtılma olabileceği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, devir hızı malzemenin cidar kalınlığını azaltmakla birlikte ilerleme hızı kadar etkilememektedir. Yüksek devir hızının en büyük etkisi, mandrelin iş parçasına temas noktasında meydana gelecek bu bölgede şekil bozukluğuna sebep olmasıdır. Şekil 18a'da iş parçası cidar kalınlığının, sabit [300 dev/dk] devir hızında, 0,8/1,6 ve 3,2 [mm/s] disk ilerleme hızlarına göre değişimi, sonlu elemanlar analizi (1,6 [mm/s] ve 300 [dev/dk]) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



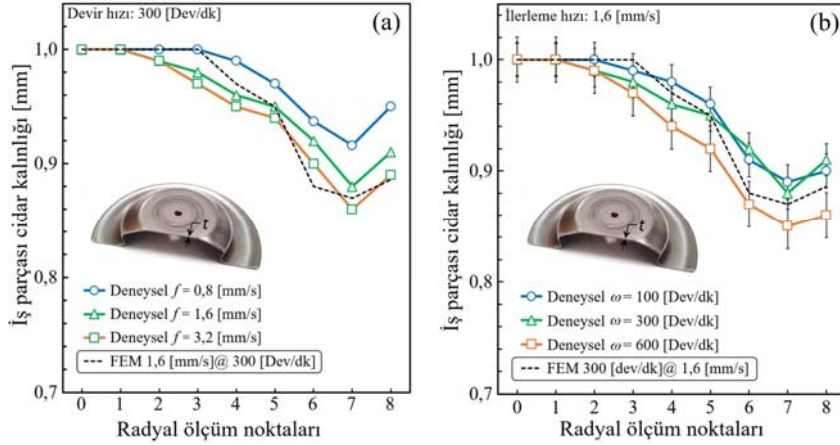
Şekil 15. a) 100 [dev/dk] b) 300 [dev/dk] c) 600 [dev/dk] devir hızlarında meydana gelen gerilme dağılımı ve d) gerilme-zaman ilişkisi (The stress distribution at spindle speed of a) 100 b) 300(c) 600 [rpm] d) stress-time relation)



Şekil 16. a) 100 [dev/dk] b) 300 [dev/dk] c) 600 [dev/dk] devir hızlarında meydana gelen gerinme dağılımı d) gerinme-zaman ilişkisi (The strain distribution at spindle speed of a) 100 b) 300 c) 600 [rpm] and d) strain-time relation)



Şekil 17. İş parçasında a) 100 [dev/dk] b) 300 [dev/dk] c) 600 [dev/dk] devir hızlarında oluşan kalınlık dağılımı (The thickness distribution at spindle speed of a) 100 b) 300 c) 600 [rpm])



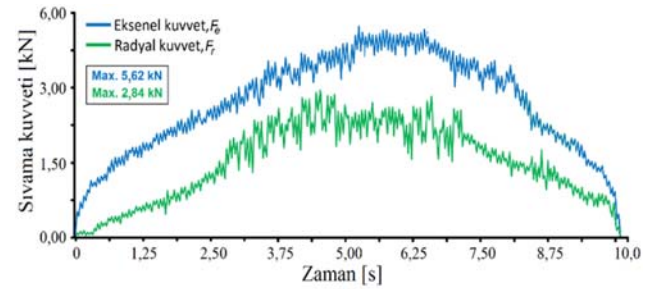
Şekil 18. İş parçası cidar kalınlığının a) 300 [dev/dk] sabit devir hızına b) 1,6 [mm/s] sabit ilerleme hızına göre değişiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması (Experimental and numerical comparison of variation of workpiece wall thickness under (a) constant spindle speed of 300 [rpm] (b) constant feed rate of 1,6 [mm/s])



Şekil 19. İş parçasının değişik işleme parametrelerine göre sıvanmış görüntüleri a) 100 [dev/dk]-3,2 [mm/s] b) 300 [dev/dk]-0,8 [mm/s] ve c) 600 [dev/dk]-1,6 [mm/s] (Machined workpiece according to different spinning parameters a) 100 [rpm]-3,2 [mm/s] b) 300 [rpm]-0,8 [mm/s] and c) 600 [rpm]-1,6 [mm/s])

Şekil 18b'de ise bu karşılaştırma sabit ilerleme hızı 1,6 [mm/s] altında, 100, 300 ve 600 [dev/dk] devir hızlarına göre yapılmıştır. Şekil 18a'da görüldüğü üzere, sabit devir hızı altında ilerleme hızı arttıkça iş parçası cidar kalınlığı düşmektedir. Yani malzeme daha çok plastik deformasyona uğramaktadır. Şekil 18b'de ise sabit ilerleme hızı koşulunda, devir hızı arttıkça cidar kalınlığında çok düşük seviyelerde azalmalar meydana gelmektedir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara çok yakın olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan hareketle, sıvama işleminde işleme parametrelerinin, deneme yanılma yapmadan, sonlu elemanlar analiziyle tahmin edilebileceği söylenebilir. Bu sonuçların yanı sıra elde edilen nihai geometride meydana gelebilecek yırtılma ve deformasyonların da işleme yapmadan önce, parça yüzeyinde oluşan gerilme ve gerinme değerlerinden, tahmin edilebileceği görülmektedir. Değişik sıvama parametrelerinde sıvanmış iş parçalarına ait görüntüler Şekil 19'da gösterilmiştir. Düşük devir ve yüksek ilerleme hızlarında şekil bozulmaları meydana gelmiştir (Şekil 19a). Ölçü tamlığı anlamında en iyi sonuçlar 300 [dev/dk]-0,8 [mm/s] parametrelerinde işlenen numunelerden (Şekil 19b), yüzey pürüzlülüğü anlamında en iyi sonuçlar, Şekil 19c'de görüldüğü gibi, 600 [dev/dk]-1,6 [mm/s] işleme parametrelerinde işlenen numunelerden elde edilmiştir. Sıvama benzetiminde sıvama diski (roller) üzerinde oluşan aksel ve radyal yönlereki kuvvetlerin işleme zamanına göre değişimi Şekil 20'de gösterilmiştir. Simülasyon, 300 [dev/dk] devir hızı ve 1,6 [mm/s] ilerleme hızına göre

yaklaşık 10 saniye sürmüştür. Analiz ise yaklaşık 30 saat sürmüştür. Sıvama diski üzerinde üç tip kuvvet oluşmaktadır, bunlar sırasıyla büyükten küçüğe doğru aksel kuvvet (F_e), radyal kuvvet (F_r) ve teğetsel (F_t) kuvvettir. Teğetsel kuvvet büyüklük olarak çok daha düşük değerlere sahip olduğu için burada gösterilmemiştir. Kuvvetler zamanla artmakta yaklaşık işleme süresinin ortalarına doğru en yüksek değerlerine (aksel 5,62 kN, radyal 2,84 kN) ulaşmaktadır.



Şekil 20. Sıvama diski üzerinde oluşan aksel (F_e) ve radyal (F_r) kuvvetlerin zamanla değişimi (The variation of axial (F_e) and radial (F_r) forces acting on the spinning disc with time)

Literatürde benzer sonuçlar [5, 7, 19-22] numaralı kaynaklarda verilmiştir. Watson ve Long [7] bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme özelliklerine yakın bir malzemeyi konik sıvadıkları çalışmalarında, en büyük

eksenel kuvveti yaklaşık 1,1 kN deneysel/0,95 kN sayısal olarak bulmuşlardır. Öte yandan, Wang ve Long [19] yine benzer malzeme özelliklerinde benzer geometriyi, bu çalışmada olduğu gibi 20 kN baskı kuvveti, uygulayarak azami eksenel kuvveti yaklaşık 5,5 kN ve radyal kuvveti yaklaşık 2,6 kN olarak bulmuşlardır.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

f	: İlerleme hızı
ω	: İş mili hızı (dakikadaki devir sayısı)
t_0	: Cidar kalınlığı
R_R	: Disk uç radyüsü
R_M	: Mandrel çapı
h_M	: Mandrel kalınlığı
θ	: Mandrel koni açısı
θ_0	: Yarım koni açısı
φ	: Sıvama diskinin eğiklik açısı
Δ	: Sapma oranı
P_T	: Sıvanmış iş parçası ideal kalınlığı
β_1	: Disk açısı ön
β_2	: Disk açısı arka
r_m	: İş parçası iç radyüsü
a_1	: Disk alın çapı ön
a_2	: Disk alın çapı arka
F_e	: Eksenel kuvvet
F_r	: Radyal kuvvet
F_t	: Teğetsel kuvvet

Kısaltmalar (Abbreviations)

FEM	: Sonlu elemanlar metodu (SEM)
CNC	: Bilgisayarla sayısal denetimli takım tezgâhi
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada sıvama işlemine etki eden ilerleme hızı ve devir hızı parametreleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Cidar kalınlığı ve şekilsel deformasyonlar bakımından analiz sonuçları deneysel sonuçlarla ve literatürle karşılaştırılmıştır. Devir hızı sabit tutulup ilerleme hızının artırılması durumunda efektif gerilmelerde artış meydana geldiği ve bu artışa bağlı olarak sıvama sonrası iş parçası üzerindeki silindirik izlerde ve dönüş sırasında iş parçası kenarındaki kırışıklıklarda artış olduğu görülmüştür. İlerleme hızındaki artışa bağlı olarak malzemelerdeki cidar kalınlığının azaldığı hem deneysel hem de sayısal olarak tespit edilmiştir. İlerleme hızı sabit tutularak, devir hızının artırılması durumunda iş parçasındaki yüzey gerilmelerinin azaldığı, ancak gerilmelerin arttığı ve bunun sonucu olarak iş parçası cidar kalınlığının, ilerleme hızına kıyasla düşük oranda da olsa, azaldığı görülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre sıvama diski üzerinde oluşan kuvvetler zamanla artmakta, yaklaşık işleme süresi ortalarına doğru en büyük değerine ulaşmaktadır. Eksenel kuvvetler radyal yöndeki kuvvetlerden daha yüksek çıkmaktadır. Tüm

bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, malzeme cidar kalınlığının nispeten daha düşük olduğu düşük ilerleme hızlarında iş parçası üzerinde yırtılma meydana gelme ihtimalinin, yüksek ilerleme hızlarına göre daha düşük olacağı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında, sıvama işleminde işleme parametrelerinin ve işleme sonucu ortaya çıkacak ürün geometrisinin, deneme yapılmadan, sonlu elemanlar analiziyle güvenli olarak tahmin edilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Zhan M., Yang H., Zhang J.H., Xu Y.L., Ma F., 3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning, *J. Mater. Process. Technol.*, 187-188, 486-491, 2007.
- Quigley E., Monaghan J., The finite element modelling of conventional spinning, *J. Mat. Process. Technol.*, 124, 360-365, 2002.
- Quigley E., Monaghan J., Metal forming: an analysis of spinning processes, *J. Mater. Process. Technol.*, 103, 114-119, 2000.
- Hua F.A., Yang Y.S., Zhang Y.N., Guo M.H., Tong W.H., Hu Z.Q., Three-dimensional finite element analysis of tube spinning, *J. Mater. Process. Technol.*, 168, 68-74, 2005.
- Qian B., He Y., Mei Z., Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18, 6-13, 2008.
- Jianguo Y., Makato M., An experimental study on paraxial spinning of one tube end, *J. Mater. Process. Technol.*, 128, 324-329, 2002.
- Watson M., Long H., Wrinkling failure mechanics in metal spinning, *Procedia Eng.*, 81, 2391-2396, 2014.
- Wang L., Long H., Ashley D., Roberts M., White P., Effects of Roller Feed Ratio on Wrinkling Failure in Conventional Spinning of a Cylindrical Cup, *P. I. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.*, 225 (11), 1991-2006, 2010.
- Honarpisheh M., Namazikhah S., Alinaghian I., Numerical and Experimental Investigation of Thickness Variation in the Spinning Process of Al-1060 Alloy, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 5 (4), 5-12, 2016.
- Sugar P., Sugarova J., Petrovic J., Anaysis of the effect of process parameters on part wall thickness variation in conventional metal spinning of Cr-Mn austenitic stainless steels, *Stroj. Vestn. J. Mech. E.*, DOI: 10.5545/sv-jme.2015.2901, 2016.
- Kong Q., Yu Z., Zhao Y., Wang H., Lin Z., Theoretical prediction of flange wrinkling in first-pass conventional spinning of hemispherical part, *J. Mat. Process. Technol.*, 246, 56-68, 2017.
- Hayama M., Tago A., The fracture of walls on shear spinning - study on the spinnability of aluminum plates, *Bulletin of Faculty of Engineering, Yokohama National University*, 17, 93-103, 1968.
- Kleiner M., Gobel R., Kantz H., Klimmek C., Homberg W. Combined methods for the prediction of dynamic instabilities in sheet metal spinning, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 51, 209-214, 2002.

14. Zeng R., Ma F., Huang L., Li J., Investigation on spinnability of profiled power spinning of aluminum alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 80, 535-548, 2015.
15. Ahmed K.I., Gadala M.S., El-Sebaie M.G., Deep spinning of sheet metals, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, 72-85, 2015.
16. Simufact Forming Version 13.2, Material Manuel, 2012.
17. Quigley E., Monaghan J. Enhanced finite element models of metal spinning, *J. Mat. Process. Technol.*, 121, 43-49, 2002.
18. Awiszus B., Hartel S., Numerical simulation of non-circular spinning: a rotationally non-symmetric spinning process, *Prod. Eng. Res. Develop.*, 5, 605-612, 2011.
19. Wang L., Long H., Investigation of material deformation in multi-pass conventional metal spinning, *Mater. and Des.* 32, 2891-2899, 2011.
20. Xia Q., Xiao G., Long H., Cheng X., Sheng X., A Review of Process Advancement of Novel Metal Spinning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 85, 100-121, 2014.
21. Essa K., Hartley P., Numerical simulation of single and dual pass conventional spinning processes, *Int. J. Mater. Form.*, 2, 271-281, 2009.
22. Wang L., Long H., A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness, *J. Mater. Process. Technol.*, 211, 2140-2151, 2011.
23. Jianguo Y., Makato M., Effects of indented feed of roller tool on parallel spinning of circular aluminum tube, *J. Mater. Process. Technol.*, 128, 274-279, 2002.
24. Zhan M., Wang X., Long H., Mechanism of grain refinement of aluminum alloy in shear spinning under different deviation ratios, *Mater. and Des.*, 108, 207-216, 2016.

