

ISSN 1302-9487

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 12

Sayı : 1

Mayıs 2011



Makina Mühendisliği Bölümü
ODTÜ - ANKARA

Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği adına Yönetim Kurulu Başkanı
Bilgin KAFTANOĞLU

ATILIM Üniversitesi

Yayın Kurulu

Metin AKKÖK
Can ÇOĞUN
İlhan KONUKSEVEN (Sorumlu Yayın Yönetmeni)

ODTÜ
ODTÜ
ODTÜ

Danışma Kurulu

Tuna BALKAN
Besim BARANOĞLU
Erhan BUDAK
Serkan DAĞ
Melik DÖLEN
Hüseyin FİLİZ
Necdet GEREN
Mustafa İ. GÖKLER
Celalettin KARADOĞAN
İzzet ÖZDEMİR
Ferruh ÖZTÜRK
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

ODTÜ
ATILIM Üniversitesi
Sabancı Üniversitesi
ODTÜ
ODTÜ
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
ODTÜ
ATILIM Üniversitesi
ATILIM Üniversitesi
Uludağ Üniversitesi
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
Makina Mühendisliği Bölümü, E Blok, No. 101
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06800 ANKARA

Tel : (312) 210 52 12, Faks : (312) 210 12 75

Web : <http://www.me.metu.edu.tr/matim>

e-mail : matim@metu.edu.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 12 Sayı: 1 Mayıs 2011

**JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION**

Vol: 12 No: 1 May. 2011

ISSN 1302-9487

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli gerçek kişiler için 10 TL, firma ve kuruluşlar için 40 TL, öğrenciler için 5 TL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

TANITIM KOŞULLARI

Kuruluş ve ürünlerini tanıtmak isteyenler hazırlayacakları tanıtım yazı ve resim taslaklarını Derneğimiz'e göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergi'de yayımlanmasını sağlayabilirler.

BANKA HESAP NUMARASI

T. İş Bankası, ODTÜ Şubesi
Hesap No: 4229 0235339
IBAN:
TR430006400000142290235339

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

- FDM (Fused Deposition Modeling) Yöntemi ile Çalışan Hızlı Prototip Cihazlarında Kullanılan Bilgisayar Yazılımı 1
**Bülent EKİCİ
Hüseyin YALTIRIK
Melda DEMİRBAŞ**
- Derin Çekme İşlemlerinde Plastik Buruşma Analizi ve Modellemesi 10
**Serhat Yalçın
Bilgin Kaftanoğlu**
- Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi 18
**Berkay Şanay
Bilgin Kaftanoğlu**
- AA2024 Alüminyum Alaşımı için Şekillendirilebilme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi 28
**Gökhan Çelik
Bilgin Kaftanoğlu
Celalettin Karadoğan
Celal Onur Alkaş**
- Ç1040 Çeliğinin Lazerle Kesilmesi Esnasında Kesme Parametrelerinin Nominal ölçüdeki Sapma Miktarına Etkilerinin İncelenmesi 34
**Zülfünaz Durukan
Abdalmecit Güldaş
Abdulkadir Güllü**

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Bülent EKİCİ

Doç. Dr.

Hüseyin YALTIRIK

Mak. Yük. Müh

Melda DEMİRBAŞ

Marmara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

FDM (Fused Deposition Modeling) Yöntemi ile Çalışan Hızlı Prototip Cihazlarında Kullanılan Bilgisayar Yazılımı

FDM yöntemi ile prototip üretebilen bir makine tasarlanıp üretilmiştir. Üç eksenli kartezyen robot tasarımı ile prototip makinenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimin bu aşamasında makinenin bilgisayar yardımıyla istenilen hareketleri yapmasını sağlayacak olan CAD/CAM yazılımı oluşturulmuştur. Bu yazılım sayesinde makine oluşturulmak istenen nesneyi parçalara bölerek ABS filament tel ile bu parçaları doldurmuştur. Ortaya çıkan taslak makine daha sonra reel testlerden geçirilerek çeşitli parçalar üretilmiştir. Projede üretilen parçalar göz önüne alındığında başlangıç hedeflerine ulaşıldığı görülmüştür.

Anahtar kelime; kartezyen robot, ekstrüder kafa, ABS filament tel

GİRİŞ

Hızlı ve aynı ürün elde etmek için geliştirilen FDM yöntemi ile çalışan bilgisayar kontrollü bir makinenin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Proje beş aşamadan oluşmuştur. Bu aşamalar sırasıyla

1. Üç eksenli kartezyen robotun tasarımı ve üretimi [1]
2. Ekstrüder kafanın tasarımı ve üretimi,
3. ABS telin üretilmesi çalışmaları [2] ve geliştirilmesi, temel köpüğünün üretimi,
4. Bilgisayar yazılımı ve son aşama olarak
5. Testlerin yapılması ve kalibrasyonlardır.

Bu çalışmada ele aldığımız konu bilgisayar yazılımıdır. Bunu gerçekleştirmek için ilk önce hızlı prototip üretimi yapan bilgisayar programı geliştirilmiş bilgisayar programının teknolojik alt yapısına ulaşılmış ve CAD/CAM yazılımı oluşturulmuştur. Bu aşamaların çoğu gerçekleştirilmiş ve makinenin montajı tamamlanmıştır.

PROGRAMIN GELİŞTİRİLDİĞİ ARAÇLAR VE BAĞLI OLDUĞU TEKNOLOJİLER

Bakış Açısı programı ve hızlı prototipleme modülü C++ programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Derleyici olarak Microsoft Visual Studio 2005 kullanılmıştır. Algoritmalarda standart C++ kütüphanesi "std"nin sınıfları ve fonksiyonları, grafik boyama için Open GL kütüphanesi, kullanıcı ara yüzü için, Microsoft'un MFC kütüphanelerinden

faydalanılmıştır. Programın kaynak kodunun versiyon idaresi ve yedeklenmesi SVN açık yazılımı ile yapılmaktadır.

BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ

Bilgisayar programı olarak geliştirilmesi planlanan kod hızlı prototip işlemleri için üretilmesi gereken özel bir yazılımdır. Yazılımın tasarlanması ve seçimi önem arz etmektedir [3]. Bu yazılımda diğer CAD ve CAM programlarında olması gereken aşağıda belirtilen temel işlevlerin de olması beklenir.

- STL, IGES, DXF, ParaSolid v.s. CAD formatlarındaki dosyaları okuyup yazabilme.
- Programın 3 boyutlu katı, yüzey ve çizgileri ayırt edebilme,
- Nesnelerin üzerindeki temel görüntü işlemlerini yapabilme; yaklaşım uzaklaşma (zoom) sağa sola kaydırma (pan), döndürme (orbit) ve değişik açılardan parçaya bakabilme,
- Parçanın taşınması (move), döndürülmesi (rotate) ve boyutlarının değiştirilmesi (scale)
- Çizgisel gösterim (wiredframe representation), renkli ve doku giydirilmiş gösterim (shade) görüntü işlemlerinin yapılabilmesi,

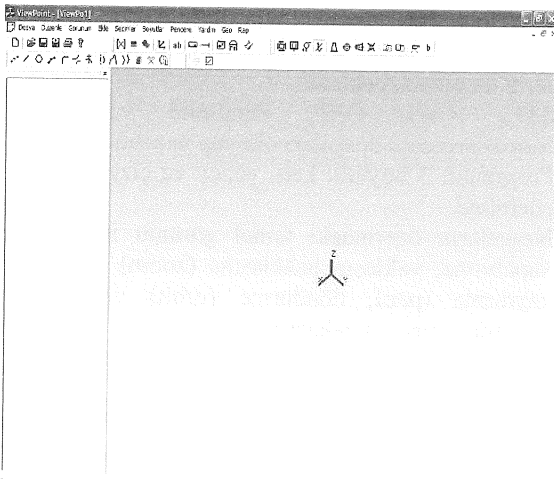
Oluşturulmak istenen CAD yazılımında yukarıdaki özellikler temel alınmıştır. Bu asgari özelliklere ilave olarak sadece hızlı prototiplemeye özgün özelliklerin de pakette yer alması planlanmıştır. Bu unsurlar aşağıda sıralanmıştır.

- STL formatında açılan dosyada bulunan katı nesnenin belirtilen z kalınlığında (genelde 0.25 mm) parametrik ve interaktif bir biçimde katmanlar halinde dilimleme (slicing),
- Bu katmanları her birinin iç ve dış konturlarının depolanması ve eğri haline getirme,
- Her bir konturun doldurulması gereken yerleri tespit edebilme,
- Doldurma işleminin ne şekilde yapılacağını tespit edebilme ve doldurma algoritması ile çizgiler kullanarak bu doldurma işlemini yapabileme,
- Destek malzemesi örülmesi gerekiyorsa bunu tespit edebilme ve bu işlemi gerçekleştirebilme
- G kodlarını çıkarıp bir dosyaya aktarabilme (POST),
- Elde edilen katmanların ve doldurulan (Taranan) bölgelerin istendiğinde gösterimini gerçekleştirebilme,

Elde edilen kodların makinenin köpük tabanında yerleşimini yapabilmesi ve CNC makineye gönderilmesini sağlayabilme.

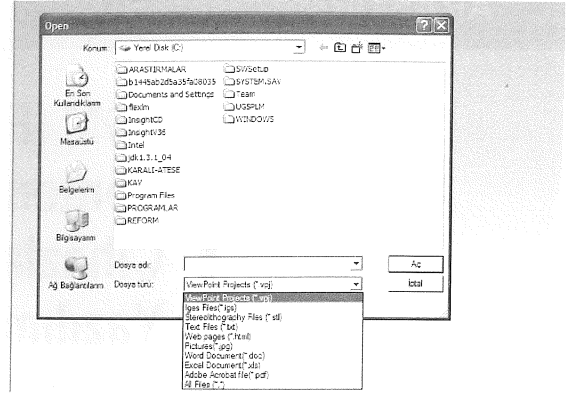
Bu yazılım için yapılan araştırmalar ışığında bir kalıp firması ile görüşülmüş ve bu konuda çalışma başlatılmıştır. Firmanın çalışanlarından bu süreçte istenilen özelliklere uygun bir kod yazımına başlanması sağlanmıştır.

Müteakip sürelerde art arda yapılan ortak çalışmalar sonucunda geliştirilmeye başlanan yazılımın algoritmaları ortaya çıkarılmış ve bu algoritmalar süreçle birlikte geliştirilmeye devam edilmiştir. Ortaya çıkan yazılımla programın kullanımı aşağıdaki açıklanmıştır. Şekil.1'de programın genel görünüşü gösterilmiştir.



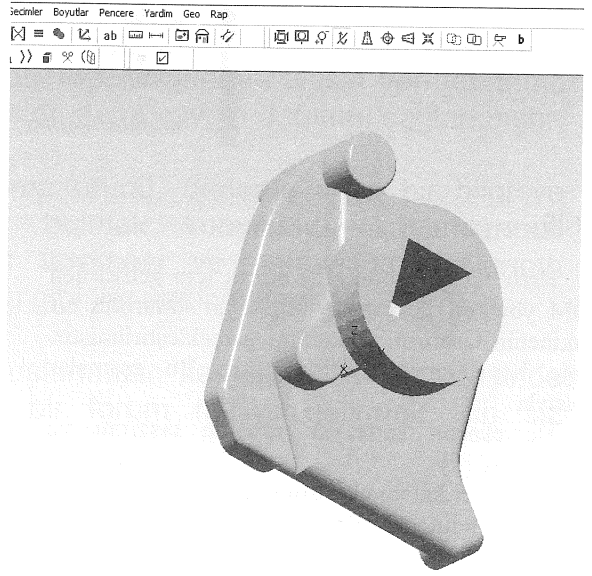
Şekil 1. Programın Genel Görünüşü

Herhangi bir parçanın açılması için yapılan yeni dosya açma işlemi Şekil 2'de gösterilmiştir.



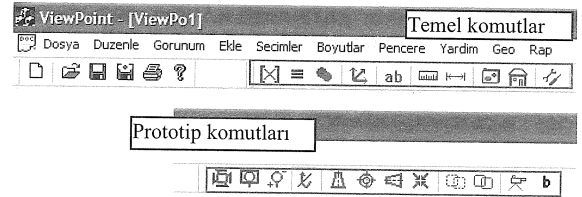
Şekil 2. Bir STL Formatlı Dosyanın Açılması

Açılan dosyada STL formatında kaydedilmiş model seçilmiştir. Dosya açıldığında doku giydirilmiş haliyle ekranda görünür. (Şekil 3)



Şekil 3. STL Formatlı Doku Giydirilmiş Parça Örneği

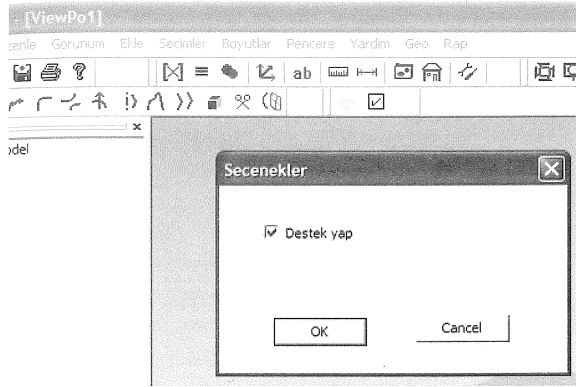
Prototip üretimi için gerekli komutlar pan, zoom, orbit model v.s temel işlem komutlarıyla birlikte. Standart araç çubuğuna yerleştirilmişlerdir. (Şekil.4)



Şekil 4. Standart Araç Çubuğu

Malzeme işleme komutları standart araç çubuğunun altındadır. Modelin katmanlara ayrılmadan önce destekleri hesaplayıp hesaplamayacağını belirtmesi

gerekmektedir. Eğer destek gerekiyorsa seçenekler düğmesinden destek yap butonu seçilmelidir. Tasarımcı desteğin gerekli olup olmadığını geometriye bakarak karar vermeli ve bu komutu kullanmalıdır. (Şekil 5)



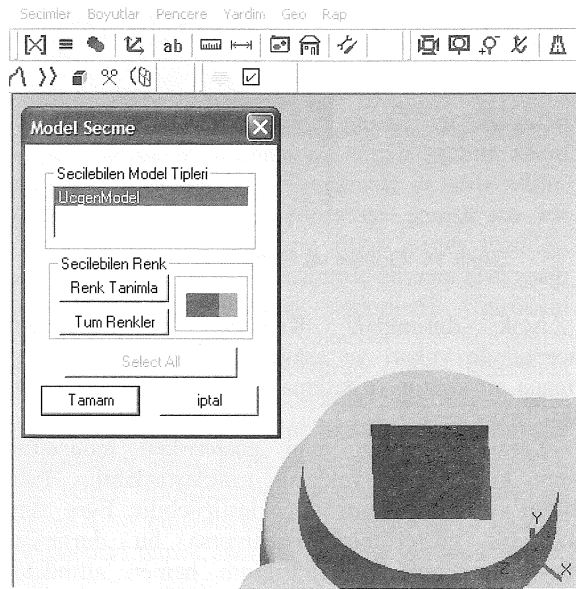
Şekil 5. Destek Katmanı Oluşturma Onay Penceresi

Bu seçenden sonra model seçim düğmesine basılmalıdır. Destek oluşturma düğmesinin hemen yanındaki düğme model seçim düğmesidir (Şekil.6).



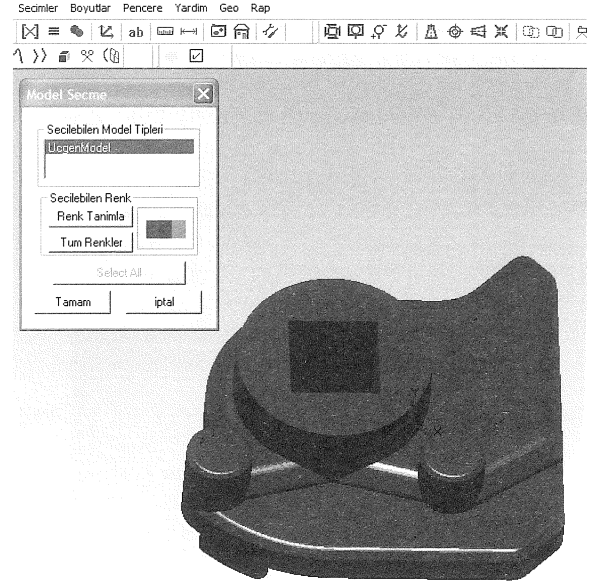
Şekil 6. Model Seçim Düğmesi

Daha sonra aşağıda açılan pencereden Mouse kullanılarak parçanın işaretlenmesi gerekmektedir (Şekil 7).



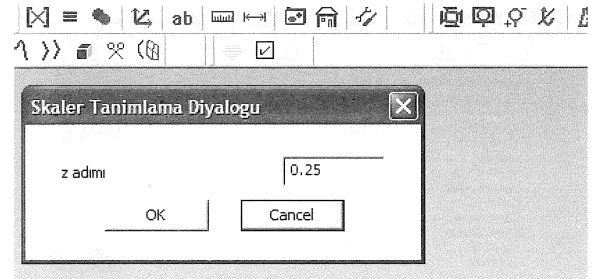
Şekil 7. Parçanın İşaretlenmesi

Parça işaretlendiğinde kırmızı rengini alır, bu da parçanın seçildiğini göstermektedir, (Şekil.8). Ardından tamam düğmesine basılarak işlem tamamlanır.



Şekil 8. Seçilmiş Parça

Bu işlemden sonra katman kalınlığının ne olacağını sorulduğu yeni bir pencere açılır. (Şekil.9)



Şekil 9. Z Katman Kalınlığının Ayarlanması

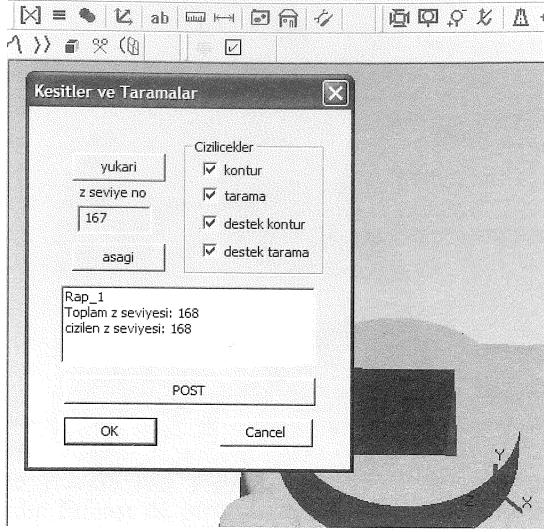
Katman kalınlığı ekstrüder kafadan elde edilecek erimiş telin çapı ile ilgilidir. En uygun değerler 0.25-0.35 mm arasında olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu yüzden değerler bu aralıkta olmalıdır.

Katman kalınlığının seçilmesi ve Ok tuşuna basılması ile katmanlar elde edilir. Yeni açılan pencerede rakamların görülmesi ile katman kesme işlemi tamamlanmış demektir, (Şekil 9). Açılan pencerede toplam planlanan ve gerçekleştirilen katman sayıları görülmektedir. Bu katmanların konturları ve içlerinin doldurulması (tarama) işlemi de yapılmıştır.

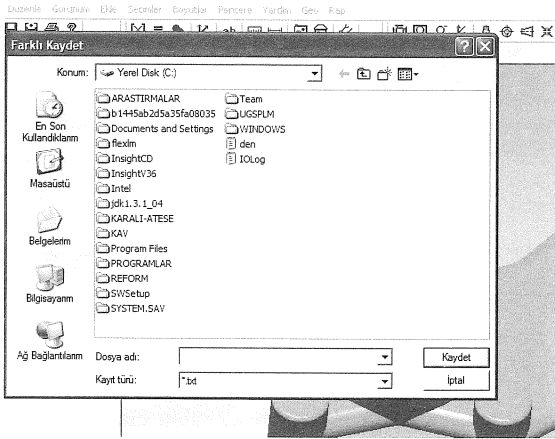
Elde edilen bu çizgilerin G kodlarına dönüştürülmesi için yine aynı pencerede bulunan POST düğmesine basmak gerekmektedir (Şekil 10). Açılan pencereye dosya için isim vermek POST'un kaydedilmesi için yeterli olacaktır (Şekil 11). Kod

ismini verip tamam tuşuna bastıktan sonra elde edilen dosyayı açtığımızda Şekil 12'deki text formatlı verileri görebiliriz.

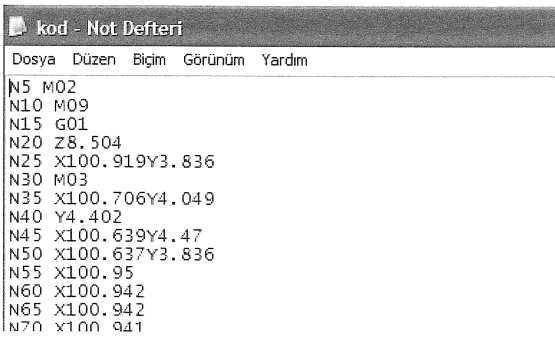
Elde edilen verilerin ekranda gösterimi için Post işleminden sonra Şekil 12'deki kod penceresini açık tutmak gerekmektedir.



Şekil 10. Kontur Tarama ve Modelin Görünür-lük Ayarları ve POST İşlem Penceresi



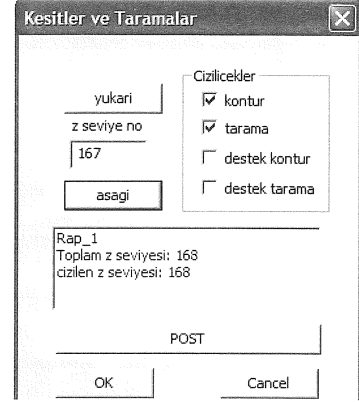
Şekil 11. POST'un Kaydedilmesi



Şekil 12. G Kodlarının Kaydedilmiş Dosyadaki Text Formatlı Görünümü

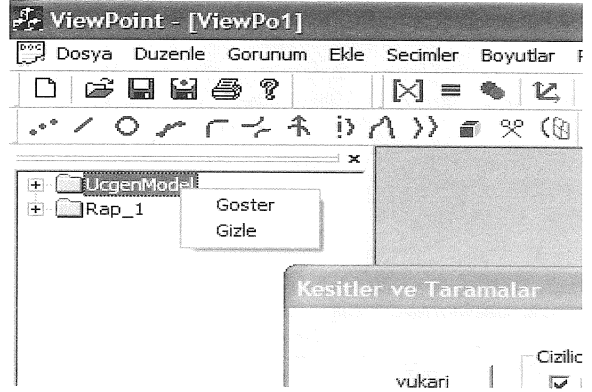
Kesitler ve Taramalar Penceresinin sağ tarafındaki Çizilecekler kısmında görünüm ayarı yapabilirsiniz (Şekil 13).

Ekrandaki katı modeli yok edip sadece elde edilen G kod kontur ve taramalarını görmek için mouse ile ekranın solunda üst köşede görülen ekrandaki katı nesnenin adını gösteren klasör işaretlenip mouse'un sağ tuşuna basıldığında açılan pencerede kontur ve taramalar işaretlenir ve tamam tuşuna basılmalıdır.



Şekil 13. Görünüm Ayarlarının Yapılması

Şekil 14'te Göster ve Gizle seçenekleri çıkmaktadır. Gizle işaretlendiğinde ekranda katı nesne gözükmez sadece çizgiler kalır.



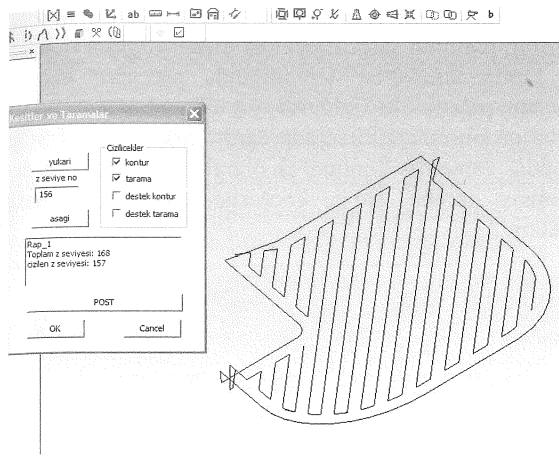
Şekil 14. Göster ve Gizle Seçenekleri

Açık durumdaki Kesitler ve Taramalar penceresinde yukarı ve aşağı butonları ile istenilen katmana ait kontur ve taramalar ekranda gösterilebilir (Şekil 15).

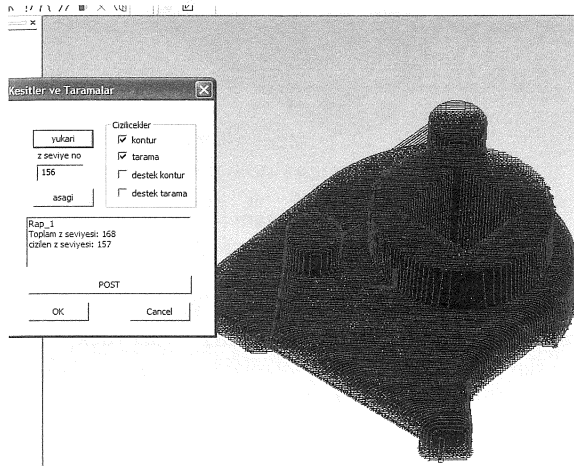
Katmanların çizgilerini gösterirken mouse'un topunu kullanarak yaklaşip uzaklaştırılabilir. Pan işlemini ve Orbit işlemi gerçekleştirilebilir. Eğer tüm konturların gösterilmesi isteniyorsa bu durumda soldaki pencerede parça isminin hemen altındaki klasörü işaretleyip sağ tuştan göster düğmesine basmak gerekecektir (Şekil 16).

ndaki
rsiniz

edilen
se ile
kati
se'un
ar ve



Şekil 15. Tek bir kesitteki kontur ve taramanın görüntüsü

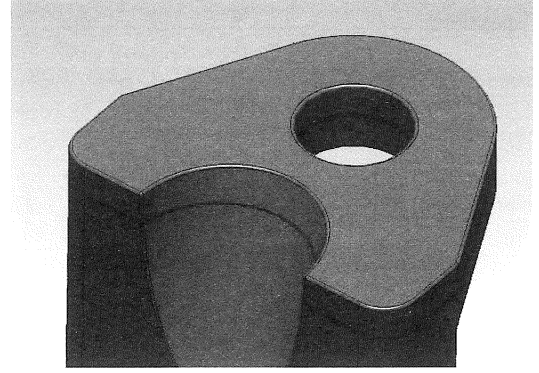


Şekil 16. Tüm Kesitlerdeki Kontur ve Taramanın Görünüm

BİLGİSAYAR PROGRAMININ TEKNOLOJİK ALT YAPISI

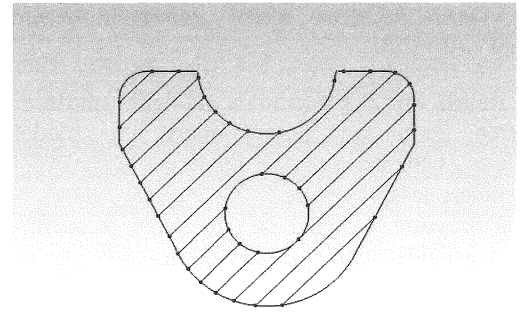
Hızlı prototiplemede model en aşağıdan başlanarak her Z katmanında kapalı hacmin kesiti olan alanın taranarak doldurulması ile elde edilir. Eğer geometri yukarı çıkılırken genişleyen bir forma sahipse bu bölgelerin altları destek maddesi ile doldurulmalıdır. Aksi takdirde taranan alan aşağı akacaktır. Yazılımımız geometri girdisini kullanarak en aşağıdan en yukarıya 0.25'lik adımlar ile Z katmanları oluşturup her katmanda doldurulacak alanı hesaplayarak ekstrüder kafanın bu alanı tarayacak koordinatlarda hareketini anlatan G kodlarını üretir. Hızlı prototipleme yazılımı STL ve IGES formatlarında geometriyi okuma ve OpenGL kütüphanesini kullanarak okunan geometriyi grafik ekranda boyama, dinamik zoom, pan, orbit, seçim yapma gibi temel işlemlere sahiptir. Yazılan prototip işlem modülde sırasıyla aşağıda açıklanmıştır. İlk işlem olarak normali Z eksenine olan ve 0.25 mm'lik adımlarla modelin en

üstünden en altına inen düzlemler ile STL modeli keşitirilmektedir. Her katmanda modelin sınırlarını gösteren kesit konturları elde edilir, (Şekil 17)



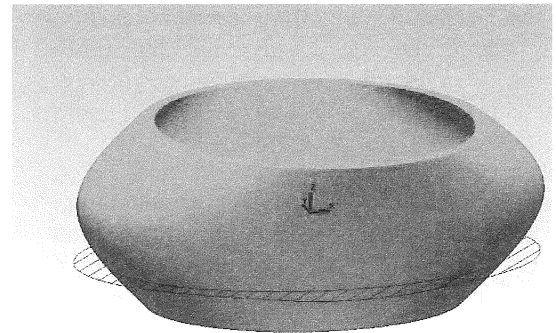
Şekil 17. Bir Z Katmanı için Modelin Sınırlarını Gösteren Kesit Konturu

Daha sonra konturların içleri X eksenine ile 45 veya 135 derece açı yapan çizgiler ile taranır. Şekil 18'de bu şekilde düzenlenmiş sınır konturlarının içinde kalan alanın taranmış hali görülmektedir.



Şekil 18. Sınır Konturları İçinde Kalan Alanın Taranması

Son adımda eğer destek yapma seçeneği seçili ise her katmanda desteklenecek alanı tanımlayan konturlar ve içlerini tarayacak paralel çizgiler hesaplanır, (Şekil 19).



Şekil 19. Aşağı Doğru Daraldığı için Destek Malzemesi ile Doldurulan Bir Parça

ctadır.
ıkmez

ar F

ar F

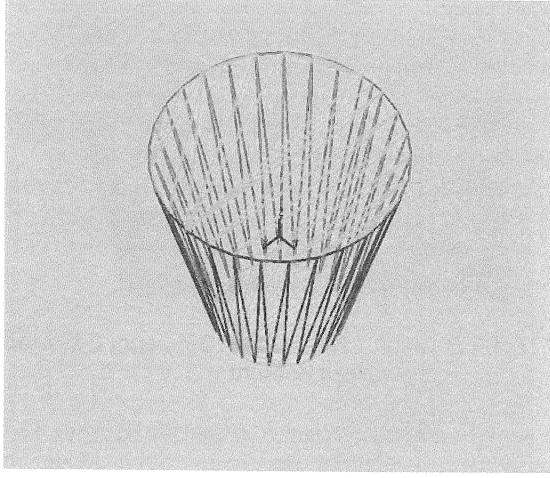
Dizilic

umalar
enilen
lebilir

ise'un
. Pan
r tüm
rumda
ndaki
asmak

RGİSİ

STL formatındaki parça Euclid uzayında köşe noktalarının mutlak koordinatları verilen üçgenlerle ifade edilmektedir (Şekil 20). Köşe noktalarına ek olarak üçgenlerin normal vektörleri de verilmektedir.



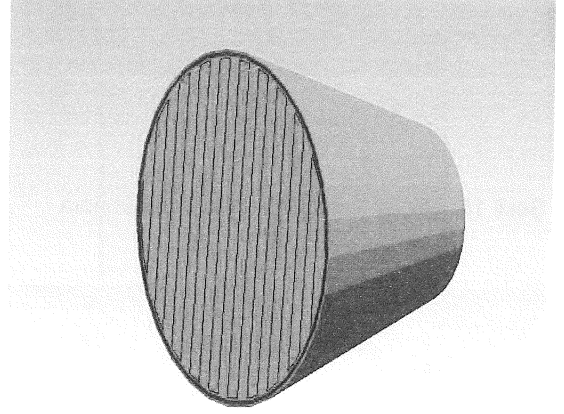
Şekil 20. Konik Bir Parçanın Üçgenler ile Temsil Edildiği STL Görüntüsü

Z KATMANLARINDA SINIR KONTURLARININ HESAPLANMASI

Belirli bir Z katmanında modelin sınırlarını gösteren konturların hesaplanması için modeli oluşturan üçgenlerin kesit düzlemi ile tek tek kesişmeleri hesaplanır.

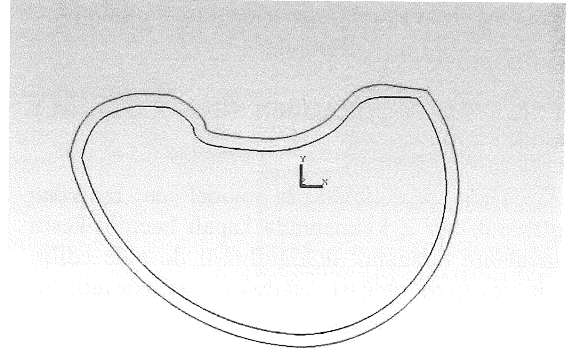
3 boyutlu uzayda iki düzlemin kesişmesi sonucu genelde bir çizgi, özel durumlarda ise boş küme veya düzlemlerin kendisi olur. Üçgen düzlemi ile kesit düzlemi kesişmesinin sonucu bulunan sonsuz çizginin üçgeni sınırlayan kenarların içinde kalan kısmı hesaplanırsa sınırlı bir çizgi veya boş küme elde edilir. Böylece kesit düzlemi ile modeli oluşturan üçgenlerin kesişmeleri ile pek çok sınırlı çizgi elde edilir. Bütün bu çizgiler kesit düzlemi üstünde (X-Y) düzleminde yer alırlar. Z koordinatları ise katmanı ile aynıdır. STL üçgen modelin su sızdırmaz katı 3 boyutlu bir hacmi tasvir ettiği kabul edilmiştir. Bu durumda kesişim çizgileri de 2 boyutta kapalı bir alanı tasvir edecektir. Bu alanın hızlı prototipleme çizgileri bir liste halinde elde edildi. Fakat bu çizgiler sıralanmış değildir. Konturlarımızı sıralı çizgiler ile tanımlayacağımız için karışık haldeki çizgi listemizi bir algoritmaya sokarak bir çizginin bittiği yerde ardından gelenin başlayacağı ardışık sıralı konturlarımızı elde ediyoruz. Sonuç olarak her Z katmanı için en az bir kapalı kontur elde ederiz, (Şekil 21).

Sınır konturlarının hesaplanması yönteminde bir katmanın alanının taranarak doldurulması gerekir. Üst üste bütün katmanlar tarandığında parçanın hacmi tamamen plastik ile doldurulmuş olur. Bir katmanın sınırlarını tanımlayan parçada eğer delik ve benzeri iç boşluklar varsa dış kontura ek olarak iç konturların da bulunması gerekir. Bu iç konturlarda mutlaka kapalı olacaktır.



Şekil 21. En Üstteki Z Katmanı İçin Sınır Kontur (Kırmızı) ve Alan Tarama Çizgileri

Program delikli modelin kesit konturunu hesapladıktan sonra modelin dış yüzeydeki dış konturları 0.125 mm yüzeyden içeri, boşluk yüzeyindeki boşluk konturlarını ise 0.125 mm boşluk sınırından dışarı öteletir, (Şekil 22)



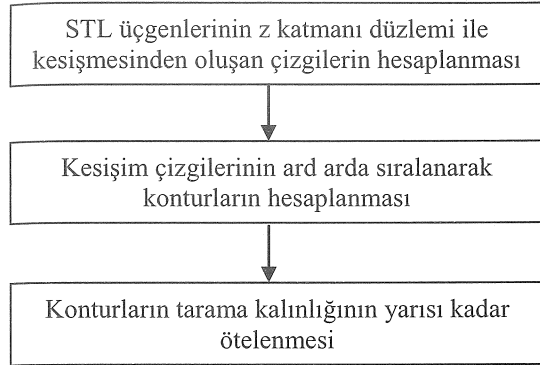
Şekil 22. Öteleme Fonksiyonunu Test Etmek Amacıyla Oluşturulan Bir Poligon

Üstteki şekilde görüldüğü gibi sınır kontur modelden biraz daha ufaktır. Ekstrüder kafanın tarama kalınlığı olan 0.25 mm değerinin yarısı olan 0.125 mm'lik bir öteleme işlemi ile geliştirilen fonksiyonların doğru çalışıp çalışmadığını anlamak için yine programın grafik alt yapısından yararlanılarak testler yapılmıştır

de bir
ir. Üst
hacmi
manın
zeri iç
rın de
kapalı

BİR Z KATMANI İÇİN SINIR KONTURU HESAPLAYAN AKIŞ ŞEMASI

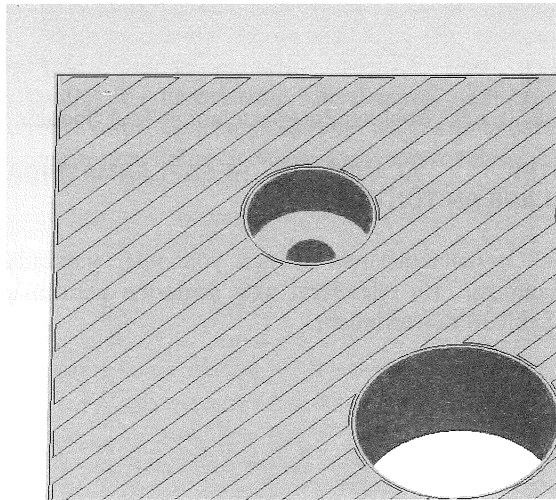
Sınır kontur hesaplama yöntemi bir akış diyagramı olarak aşağıdaki şemada açıklanmıştır.



Şekil 23. Z Kontur Hesaplama Akış Şeması

SINIR KONTURLARIN İÇ ALANININ TARANMASI

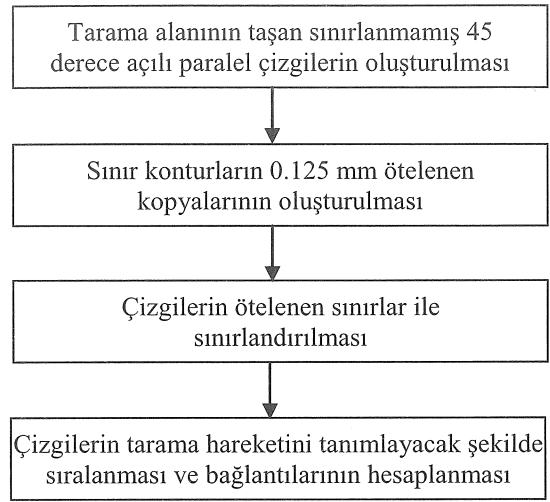
Her Z katmanı için sınır konturları elde edildikten sonra bu konturların içlerini doldurmak amacıyla X eksenine 45 derece açıyla tarama çizgileri hesaplanır. Bu işi yapan algoritmada öncelikle katmanın konturlarından oldukça uzun 45 derece açılı bütün alanı tarayacak paralel çizgiler oluşturulur. Sınır konturlarının kopyaları 0.125 mm daha tarama alanını küçültecek şekilde ötelenir. Bu paralel çizgiler ötelenen konturlar ile kesilerek sınırlanır. En son olarak tarama çizgilerinin birbirleri ile bağlantısı yine ötelenmiş sınır konturları ile yapılır ve çizgiler hareket sırasına uygun şekilde dizilir, (Şekil 24).



Şekil 24. Sınır Konturlarının İç Alanının Taranması

ALAN TARAMA ALGORİTMASINI AKIŞI

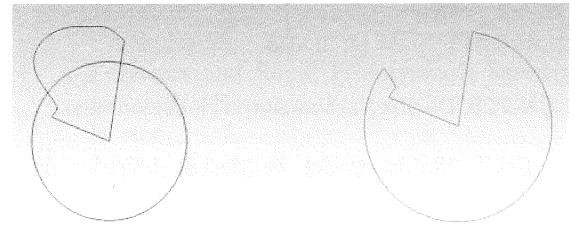
Yukarıda açıklanan işlemler bir akış diyagramı olarak Şekil 25'de verilmektedir.



Şekil 25. Alan Tarama Algoritma Akış Diyagramı

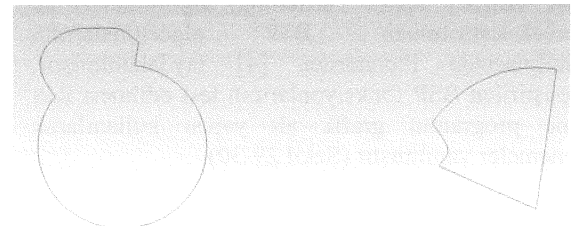
DESTEKLERİN HESAPLANMASI

Destek alanı modelin Z doğrultusunda yukarı doğru ilerlerken genişleyen alanını destekleyerek aşağı akmayı engellemek amacıyla yapılır. Bu destek alanını hesaplamak için algoritmamız modelin en üstünden başlayarak aşağı doğru ardışık olarak konturlar üzerinde boolean işlemleri yapar. Kontur çıkarma işlemi Şekil 26'te gösterilmektedir



Şekil 26. Poligon Boolean İşlemleri (Kırmızıdan Diğerinin Çıkarılması)

Birleştirme kümesi veya ortak bölgenin belirlenmesi Şekil 27'de gösterilmektedir.



Şekil 27. Birleşim Kümesi veya Ortak Bölgenin Belirlenmesi

Parçanın üst yüzeyindeki ilk katmanda
En büyük tarama alanı = en yukarı seviyenin kesit alanıdır.

ur

turunu
i dış
boşluk
boşluk

acıyla

elden
dınlığı
lik bir
doğru
gramın
ıştır

RGİSİ

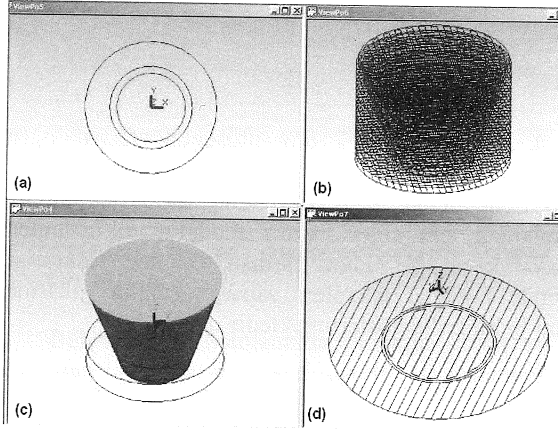
Daha sonra alt katmanlar oluştukça en büyük tarama alanı güncellenir.

$En\ büyük\ tarama\ alanı = Mevcut\ Alan\ U\ En\ büyük\ tarama\ alanıdır.$

Bu boolean işlemi en yukarı katmanın bir alt seviyesinden başlanarak her seviyede güncellenir. Ardından o anki katmanın destek alanını bulmak için.

$Mevcut\ destek\ alanı = En\ büyük\ tarama\ alanı - Mevcut\ tarama\ alanı\ hesaplanır.$

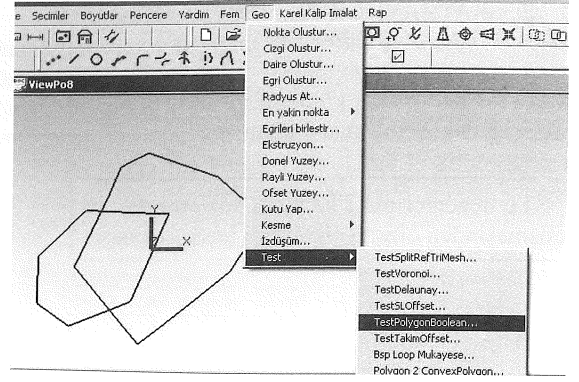
Konik modelde yukarıdan aşağıya inildikçe sınır konturların toplanması hep en üstteki katman kesiti olan büyük daire sonucunu verir. Bu daireden o katmana ait kesit daire çıkarılınca destek alanı elde edilir. Şekil 28'da destek alanın hesaplanmasına bir örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 28. Destek Taramalarının Hesaplanması

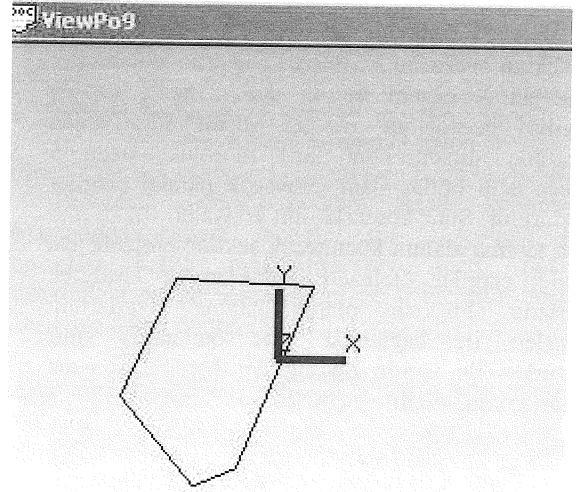
Şekil 28a'da model ve destek bölgelerinin kontur çizgileri, Şekil 28b'de de model ve destek bölgeleri katmanlar halinde bütün olarak görülmektedir. Şekil 28c'de de modelin katı haldeki görüntüsü ve üst yüzeyinin tabandaki izdüşümü görülmektedir. Şekil 28d'de en alt katmanın hesaplamalar sonucu bulunan taramaları görülmektedir.

Kesit poligonları üzerindeki boolean işlemleri BSP (Binary Space Partitioning) algoritmaları ile gerçekleştirelmıştır. BSP algoritmalarının yazılmasında literatürden [4] faydalanılmıştır. Geliştirilen BSP fonksiyonlarının test edilmesi için yine programın grafik alt yapısı kullanılarak denemeler yapılmıştır (Şekil 29-30).



Şekil 29. BSP Boolean Fonksiyonlarının Test Edildiği Bir Örnek

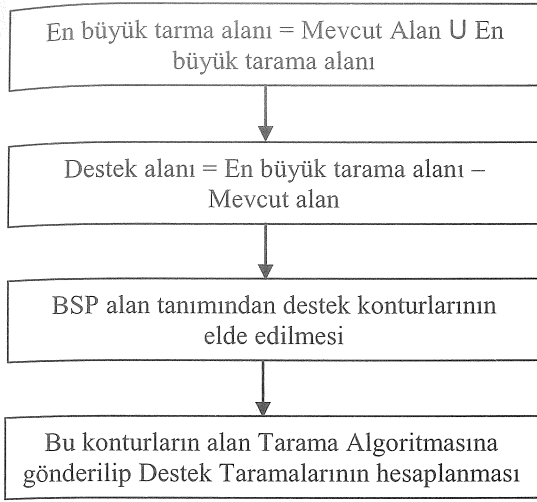
Şekil 29'da görüldüğü gibi kesişen iki poligon kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak Şekil 30'da da doğru bir şekilde hesaplanan kesişim bölgesi elde edilmiştir.



Şekil 30. BSP Boolean Fonksiyonlarının Test Sonucu

DESTEK ALANIN HESAPLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEM

Destek hesaplanmasında izlenen yöntemler yukarıda açıklanmıştır. Bu işlemlerin akış şemasına getirilmiş hali Şekil 30'de verilmiştir.



Şekil 30. Destek Hesaplama Yöntemi Akış Şeması

CAD/CAM YAZILIM ÇALIŞMALARI BULGULARI

Yapılan denemelerde üretilen yazılımın bazı fonksiyonlarının oldukça başarılı olduğu bazı fonksiyonlarında beklenmedik hatalar olduğu görülmüştür. Programda genel işlemler ile ilgili her hangi bir sorun yoktur. Örneğin dosya okuma dosya kayıt etme, model ve destek malzeme katmanlarının sıralanması gibi. Karşılaşılan tek bir sorun vardır o da kesit taramaları sırasında birden fazla döngü olduğundan beklenmedik çizgilerin oluşmasıdır. Deney aşamasında bu çizgiler koddan elle temizlenmiştir. Üretilen temel şekillerde sorun gözlenmemiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada üretilmesi önerilen prototip makine yapılmıştır. Bu üretimde var olan teknolojinin unsurlarının incelenmesi amacıyla çeşitli satın almalar yapılmış ve ekipmanların çalışma prensipleri incelendikten sonra bilgisayar

yazılımıyla ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Projede sisteminin çalışması için gereken CAD/CAM yazılımı tamamlanmıştır. Bu yazılım projenin bir paket halinde tamamlanmasını sağlamıştır,
2. Bakış Açısı programı ve hızlı prototipleme modülü C++ programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir,
3. Programın kaynak kodunun versiyon idaresi ve yedeklenmesi SVN açık yazılımı ile yapılmıştır,
4. Kesit poligonları üzerindeki boolean işlemleri BSP (Binary Space Partioning) algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir,
5. Karşılaşılan sorun kesit taramaları sırasında birden fazla döngü olduğundan beklenmedik çizgilerin oluşmasıdır. Deney aşamasında bu çizgiler koddan elle temizlenmiştir ve sorun gözlenmemiştir,

TEŞEKKÜR

Bu bilgileri elde etmemizi sağlayan TÜBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Pique A., Chrisey D.B., "Direct Write Technologies for Rapid Prototyping Applications: In Sensors, Electronics and Integrated Power Sources", Academic Press; 1st edition, 2001. Pp:157.,
2. Cohen Y.B., Zhang Q.M., "Electroactive Polymers and Rapid Prototyping", Materials Research Society Symposia Proceedings, Boston,
3. Gibson I., "Software Solutions for Rapid Prototyping". Professional Engineering Pub. Ltd., 2002. Pp:48. ,
4. Shneider P.J., Eberly D.H., "Geometric Tools for Computer Graphics", Elsevier Science, 2002. Pp:55.

Derin Çekme İşlemlerinde Plastik Buruşma Analizi ve Modellemesi

Serhat Yalçın

Mak. Yük. Müh.
Aselsan A.Ş.
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu

Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bu çalışmada derin çekme işlemlerinde buruşma davranışları ticari bir sonlu elemanlar kodu kullanılarak elde edilmiştir. Plastik buruşmayı anlamak için baskı plakası kuvvetinin buruşmaya olan etkisi araştırılmıştır. Değişik baskı plakası kuvvetleri için aksel simetrik kap modellemesi incelenmiştir. Buruşma kararsızlığı işlemin enerji grafiklerinde gösterilmiştir. Buruşmadaki anizotropi etkisi çelik malzemelerde, izotropik ve izotropik olmayan nümerik deneyler karşılaştırılarak tartışılmıştır. Sayısal analizlere ilaveten, hidrolik pres kullanılarak klasik derin çekme işleminin deneysel doğrulama çalışması yapılmıştır. Farklı ölçülerdeki parçalarda, dalga oluşumu 4 ayrı kalınlık değeri için gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buruşma, Derin Çekme, Sonlu Elemanlar Analizi, Sac Metal Şekillendirme, Baskı Plakası Kuvveti

GİRİŞ

Derin çekme, en önemli sac levha şekillendirme metodlarından biridir. 2 boyutlu sac parça 3 boyutlu hale derin çekme ile şekillendirilir. Derin çekme işlemlerinde, sac metal kalıp üzerine yerleştirilir ve zımba yardımıyla kalıp boşluğuna sac metal sıvanır. Baskı plakası derin çekme işlemi boyunca, sac metale flanaj (kalıp ve baskı plakası arasında kalan alan) bölgesinde baskı uygular. [1]

Malzeme özellikleri, derin çekme takımlarının (kalıp, zımba, baskı plakası...) seçimi ve yağlama koşulları derin çekmeyi etkileyen faktörler arasında gösterilebilir. Bu faktörler yüzünden derin çekme işlemiyle elde edilen parçalarda bazı hatalar gözlemlenebilir. Boyun verme, yırtılma, buruşma ve kötü yüzey görünümleri bu hatalardan bazılarıdır. [2]

Boyun verme ve yırtılma, parçadaki uzamadan kaynaklanan çekme kararsızlığıdır. Boyun verme ve yırtılmadan dolayı parçanın dayanıklılığı azalır ve görünümü bozulur. Diğer bir hata ise buruşmadır. Buruşma, boyun verme ve yırtılmanın aksine, basma kuvvetinden kaynaklanır. Yüksek basma gerinimlerinden dolayı parçada dalga formu oluşur, diğer bir deyişle parça plastik burkulmaya maruz kalır. Dalgalanma tamamen derin çekilmiş bir parçanın duvar kısmında görülür. Düzlemsel plastik anizotropi dalgalanmaya sebep olur. Bunlara ek olarak "portakal kabuğu" oluşumu parçanın görünümünü olumsuz etkileyen bir hatadır.

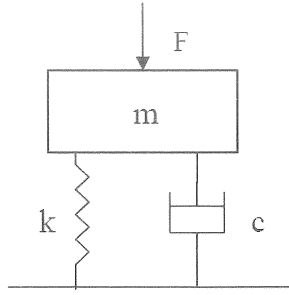
Derin çekme işlemi sırasında buruşan bir parça kullanılmaz ve ıskarta edilir. Bu tür bir durum hem para hem de zaman kaybına yol açar. Bu nedenlerden

ötürü buruşma engellenmelidir. Buruşmayı önlemede en çok kullanılan iki yöntem baskı plakası uygulaması ve pot çemberi kullanılmasıdır. Baskı plakası uygulamasında iki metot vardır. İlk metot baskı plakası ve kalıp arasındaki mesafenin sabit tutulmasıdır. Böylece sac malzeme kalınlığı sabit kalır ve dalga oluşumu önlenir. İkinci metotta ise baskı plakası aracılığıyla malzemeye flanaj bölgesinde basma kuvveti uygulanır. Bu kuvvete baskı plakası kuvveti denir. Uygulanacak kuvvetin büyüklüğü çok iyi ayarlanmalıdır. Eğer gereğinden fazla bir kuvvet seçilirse parça yırtılabilir fakat gereğinden az seçilen kuvvet buruşmayla sonuçlanır. [3]

Derin çekme işlemlerinde buruşma oluşumunun önceden tahmin edilebilmesi çok kritik bir konudur. Üretimin ana amaçlarından biri de hatasız parça elde etmektir. Üretimin ilk adımı olan tasarım aşaması, bütün üretim sürecini etkiler. Tasarımcı üretimde oluşabilecek bütün problemleri ve bu problemlerin çözümlerini bilmelidir. Üretim süreçlerinde daha kaliteli parça elde edebilmek için bir sürü çalışma yapılmaya devam etmektedir. Bu çalışma derin çekme işlemlerinde flanaj bölgesinde görülen buruşma ve bu buruşmanın önlenmesini araştırmıştır.

FORMÜLASYON

Dinamik-eksplisit yöntemler dinamik bir problemin çözümünü temel alır. Bu metodların temelini açıklamak için basit bir kütle-yay-damper sistemi kullanılabilir.



Şekil 1. Tek boyutlu kütle – yay – damper sistemi

Şekil 1'deki sistemin hareket denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (1)$$

Bu eşitlikte m nesnenin kütlesi, c damperin sönümlenme katsayısı, k yayın pekliği, u , \dot{u} , ve \ddot{u} sırasıyla kütle için t anındaki anlık deplasmanı, anlık hızı ve anlık ivmesidir. $F(t)$ dış kuvvetin zaman tabanlı fonksiyonudur. [4]

Hareket denklemleri, merkezi fark yöntemi kullanılarak çözülebilir.

$$\dot{u}^t = \frac{1}{\Delta t} (u^{t+\Delta t} - 2u^t + u^{t-\Delta t}) \quad (2)$$

$$\ddot{u}^t = \frac{1}{2\Delta t} (u^{t+\Delta t} - u^{t-\Delta t}) \quad (3)$$

(2) ve (3) denklemleri (1) denklemine yerleştirip yeniden düzenlenirse

$$\left[\frac{1}{(\Delta t)^2} m + \frac{1}{2\Delta t} c \right] u^{t+\Delta t} = F(t) - ku^t + \frac{m}{(\Delta t)^2} [2u^t - u^{t-\Delta t}] + \frac{c}{2\Delta t} u^{t-\Delta t} \quad (4)$$

$t + \Delta t$ anındaki deplasmanları, t ve $t - \Delta t$ anlarındaki bilinen deplasman konfigürasyonları kullanılarak bulunur. Bu zaman bölümlenme tasarımına hareket denkleminin dinamik açık integrasyonu olarak adlandırılır. Kapalı integrasyon tekniklerinde çözüm, $t + \Delta t$ anındaki bilinmeyen deplasman değerlerine de bağlıdır.

Zaman aralığı, Δt , kritik zaman aralığından Δt_{cr} küçük olmalıdır. Kritik zaman aralığı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Delta t_{cr} = \frac{T}{\pi} = \frac{2}{\omega} = 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5)$$

Bu eşitlikte T sistemin aygen periyodunu, ω sistemin aygen frekansını simgelemektedir.

Deplasman tabanlı sönümlenme matrisi eklenmiş dinamik-açık sonlu eleman analizi için genel formül aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$M \ddot{u}' + C \dot{u}' = F' - I' \quad (6)$$

Bu formülasyonda $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönümlenme matrisini, F' ve I' ise sırasıyla dış ve iç kuvvetleri temsil etmektedir.

(2) ve (3) denklemleri merkezi fark yöntemi kullanılarak (6) denklemine uygulanırsa:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \quad u^{t+\Delta t} = \\ F' - I' + \frac{1}{(\Delta t)^2} M \quad 2 u^t - u^{t-\Delta t} \\ + \frac{1}{2\Delta t} C \quad u^{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (7)$$

$t = 0$ anındaki deplasman, hız, iç ve dış kuvvetler bilinmektedir, ancak ilk adımda $t = -\Delta t$ anındaki deplasman değerleri de çözüm için gerekmektedir. Bu bilgi aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir (8):

$$u^{-\Delta t} = u^0 - \dot{u}^0 \Delta t - \frac{1}{2} \ddot{u}^0 \Delta t^2 \quad (8)$$

Sistemin $t = 0$ anındaki ivmeleri, \ddot{u}^0 , aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$M \ddot{u}^0 = F^0 - I^0 - C \dot{u}^0 \quad (9)$$

Hesaplama verimliliğini arttırmak amacıyla kütle matrisi yerine diagonal kütle matrisi kullanılabilir. Böylece denklem (9) için faktörizasyon ihtiyacı ortadan kalkar.

ANALİZ

Bu çalışmada flanj bölgesinde görülen buruşma araştırılmıştır. Zımba, kalıp, baskı plakası geometrileri işlem parametreleri ve malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir.

Zımba çapı 100 mm ve zımba dip radüsü 7 mm, kalıp çapı 102.5 mm ve kalıp dip radüsü 9.5 mm olarak modellenmiştir. Derin çekme analizinde 210 mm çapında ve 1 mm kalınlığında sac metal parça kullanılmıştır.

Tablo 1. Malzeme Özellikleri

Malzeme	E (GPa)	ρ (g/cm ³)	ν	ϵ_0
Çelik	221,368	7,8	0,3	0,00876

K (MPa)	n	R (0°)	R (45°)	R (90°)
547,3	0,2692	2,160	1,611	2,665

Malzeme modeli olarak elasto-plastik model kullanılmıştır. Plastik akış simülasyonu için Swift kanunu (10) formülasyonlara adapte edilmiştir. Sürtünme katsayısı bütün yüzeylerde 0,0426 olarak alınmıştır.

$$\sigma = K \cdot \epsilon + \epsilon_0^n \quad (10)$$

Baskı Plakası Kuvvetinin Buruşmaya Etkisi

Bu çalışmada baskı plakasının buruşmaya olan etkisi incelenmiştir. Çekme derinliği 4 kN' dan düşük baskı plakası kuvvetleri için 20 mm, 4 kN' dan yüksek baskı plakası kuvvetleri için 40 mm olarak alınmıştır. Sac metal'e uygulanan 1 N ve 4000 N arası baskı plakası kuvveti sonuçları Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. 20 mm Çekme Derinliğinde Baskı Plakası Kuvvetlerine Bağlı Oluşan Dalga Sayısı

Baskı plakası Kuvveti [N]	Oluşan Dalga Sayısı
1	4
10	4
100	4
250	8
500	8
1000	10
2000	14
3000	16
4000	16

Tablo 2'den anlaşılacağı gibi baskı plakası kuvveti arttıkça flanaj bölgesinde buruşmadan dolayı oluşan dalga sayısı artmaktadır. 4000 N' dan büyük baskı plakası kuvvetleri için çekme derinliği 40 mm olarak seçilmiştir, sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.

Çalışmada, çelik malzeme için 40 mm çekme derinliğinde 7000 N baskı plakası kuvvetinde buruşma önlenmiştir. Flanj bölgesinde oluşan maksimum dalga sayısı 24 olarak elde edilmiştir.

Tablo 3. 40 mm Çekme Derinliğinde Baskı Plakası Kuvvetine Bağlı Oluşan Dalga Sayısı

Baskı plakası Kuvveti [N]	Oluşan Dalga Sayısı
4000	16
5000	16
6000	20
6500	24
6750	24
7000	yok

Çekme Derinliğinin Buruşmaya Etkisi

Bu çalışmada çekme derinliğinin buruşmaya olan etkisi incelenmiştir. Belli baskı plakası kuvvetleri için farklı çekme derinliklerinde oluşan dalga formları Şekil 2 'de gösterilmiştir.

Baskı plakası kuvveti 1 N iken flanaj bölgesinde buruşma 5 mm çekme derinliğinden önce gözlemlenmiştir. 1000 N baskı plakası kuvveti için ise buruşma 10 mm çekme derinliğinde görülmüştür, diğer bir deyişle parça 10 mm çekme derinliğine kadar buruşma yaşamamıştır. Son olarak, 3000 N kuvvet buruşmayı 15 mm çekme derinliğine kadar engellemeyi başarmıştır. (Bkz. Şekil 2)

Anizotropinin Buruşmaya Etkisi

Bu çalışmada malzeme özelliklerinden biri olan anizotropinin buruşmaya olan etkisi araştırılmıştır. Malzeme modellemesi sırasında Tablo 1' de verilen malzeme özellikleri aynen kullanılmış fakat malzeme modeli izotropik olarak seçilmiştir. İzotropik ve anizotropik malzemenin buruşmaya olan etkisi Tablo 4' de gösterilmiştir.

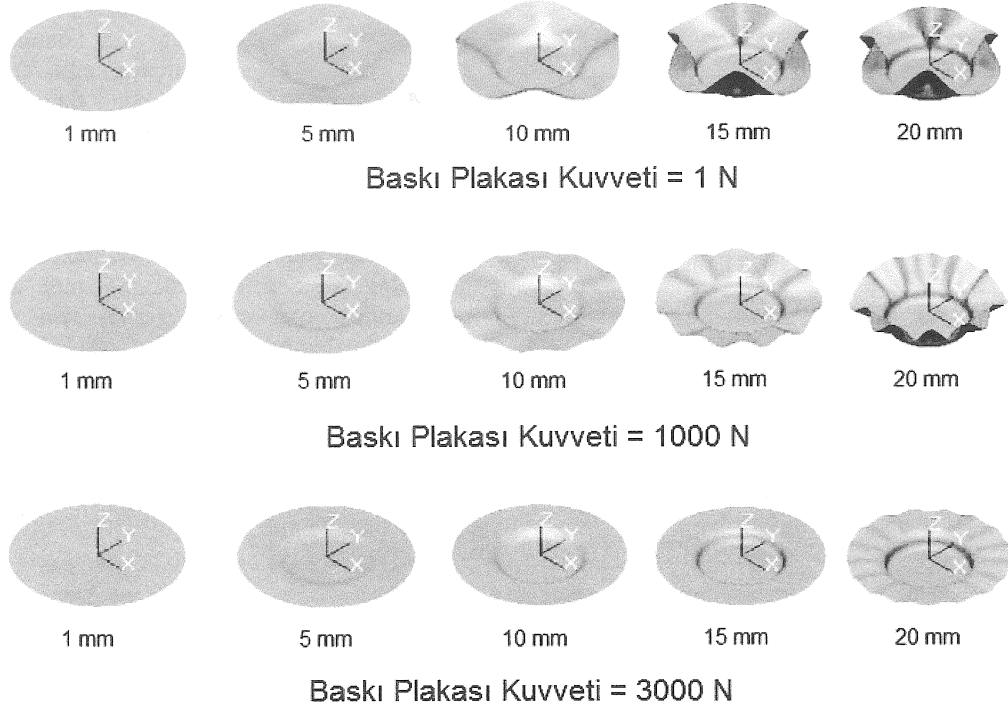
Tablo 4. Anizotropik ve İzotropik Malzeme için Elde Edilen Buruşma Dalga Sayısı

Baskı Plakası Kuvveti	Anizotropik Malzeme Dalga Sayısı	İzotropik Malzeme Dalga Sayısı
1	4	4
100	4	4
500	8	8
1000	10	12
2000	14	16
3000	16	16
5000	16	20
6000	20	20
6500	24	24

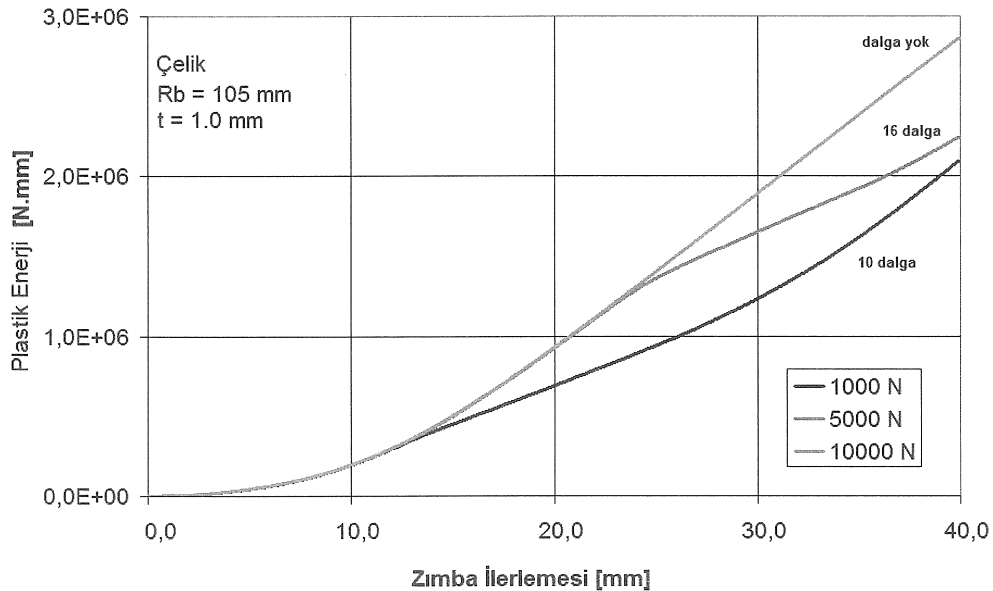
Plastik Enerji

Buruşma problemi derin çekme işleminin enerji grafikleriyle incelendiğinde, flanaj bölgesinde neden bu istenmeyen problemin görüldüğü daha iyi bir şekilde anlaşılır. Farklı baskı plakası kuvvetleri uygulanarak yapılan derin çekme işlemlerinin enerji grafikleri incelendiğinde buruşma ile ilgili önemli

bulgular elde edilmiştir. Derin çekme işleminde sac metal en az enerji gereken formda şekillenir. Diğer bir deyişle, eğer malzemenin derin çekme enerjisi buruşma enerjisinden küçükse, malzeme derin çekilir. Baskı plakası kuvveti artırılarak, buruşma enerjisi artırılır ve malzeme derin çekme işlemi esnasında buruşma yaşamaz. (Bkz Şekil 3)



Şekil 2. 1 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm Çekme Derinliklerinde; 1 N , 1000 N, 3000N Baskı Plakası Kuvvetleri Sonucu Oluşan Dalga Sayıları



Şekil 3. 1000 N, 5000 N ve 10000 N Baskı Plakası Kuvvetlerindeki Derin çekme Enerjisi Grafikleri

DENEY

Çalışmanın deney kısmında 0.5 mm, 1.0 mm, 1.2 mm ve 2.0 mm kalınlıklarında 4 adet AL1050 sac metal malzeme kullanılmıştır. Malzeme özelliklerini elde etmek amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi yapılarak elde edilen malzeme özellikleri Tablo 5 'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 4 Farklı Kalınlıktaki AL1050 Malzeme Özellikleri

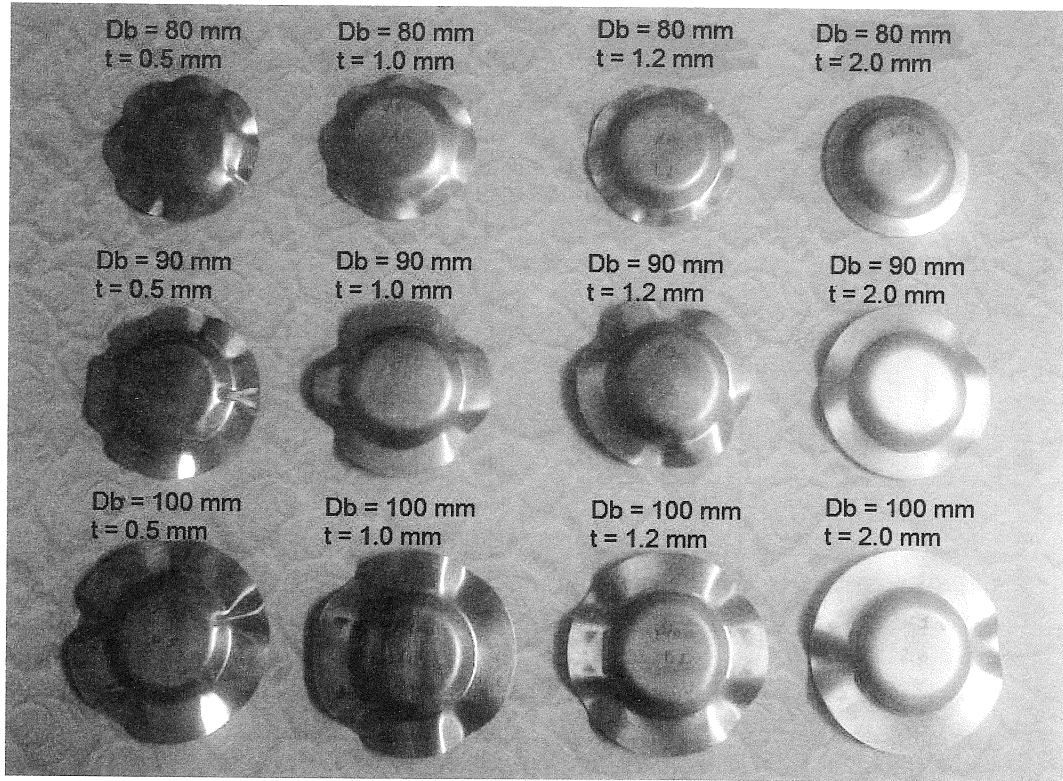
Malzeme AL1050	E (GPa)	K (MPa)	n	R (0°)	R (45°)	R (90°)
0.5 mm	59,133	99,847	0,1196	0,637	0,496	0,578
1.0 mm	59,766	140,86	0,0872	0,896	0,611	0,660
1.2 mm	58,888	162,33	0,0963	0,652	0,751	0,684
2.0 mm	57,944	286,28	0,0976	0,681	0,833	0,803

Derin çekme deneyinde çapları 80 mm, 90 mm ve 100 mm olan sac metal parçalar kullanılmıştır. Her bir çap değeri için 4 ayrı kalınlıktaki AL1050 malzemesi hazırlanmıştır. Derin çekme deneyi ODTÜ – Metal İşleme Laboratuvarında, Tinius-Olsen Test Makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

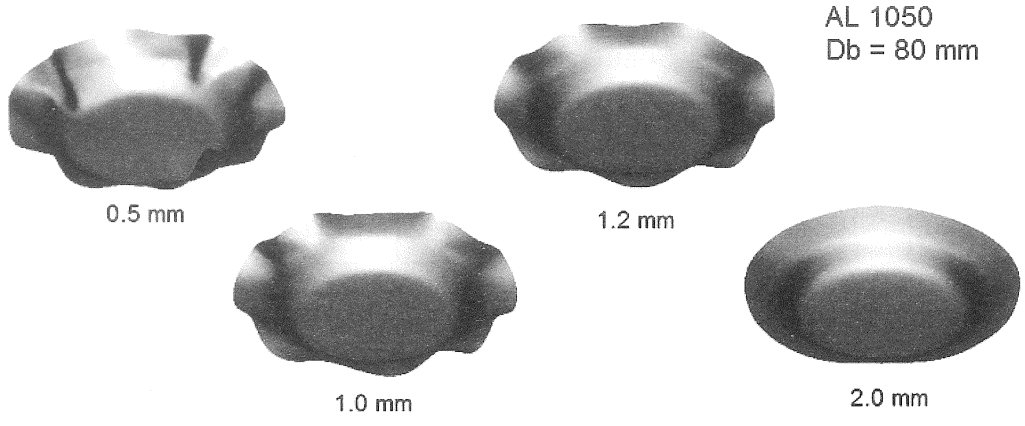
Deney sonuçları ile kıyaslama yapılması amacıyla deney düzeneği modellenmiş ve derin çekme işlemlerinin analizi yapılmıştır. Deney düzeneğinde zımba çapı 50 mm, kalıp çapı ise 54 mm olarak kullanılmıştır. Zımba ve kalıp dip radüsleri ise 5 mm olarak alınmıştır. Yağlama için gres yağı kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı bütün yüzeyler için 0.08 olarak alınmıştır.

Derin çekme sırasında baskı plakası kuvvetini sıfırlamak için parça kalıp ve baskı plakası arasına 4 adet 15 mm yüksekliğinde pim konulmuştur. Bu sayede baskı plakası parçaya etki etmemiş ve buruşma serbest bir biçimde flanaj bölgesinde görülmüştür.

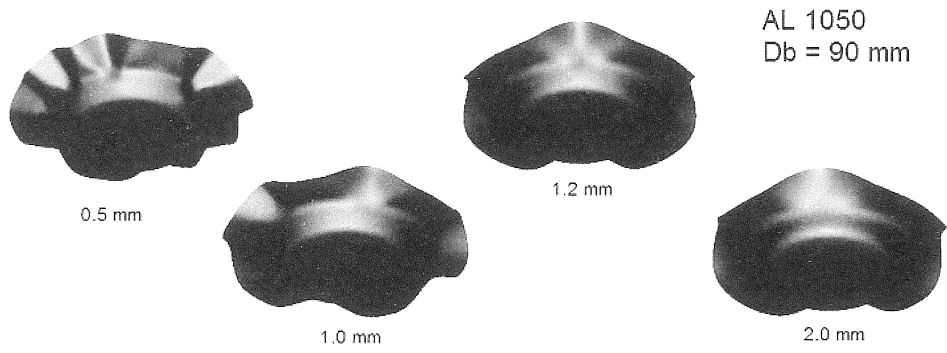
Deneyde elde edilen bütün parçalar, kalınlıkları ve çapları belirtilerek Şekil 4' te gösterilmiştir. Sac kalınlığının buruşmaya olan etkisi Şekil 4 'de görülmüştür. Analiz sonuçları ise Şekil 5, 6 ve 7' de gösterilmiştir. Sac kalınlığı 0.5 mm olan deney parçalarında aynı çap değerleri için daha fazla buruşma gözlemlenmiştir. Sac metal kalınlığı arttıkça buruşma azalmıştır. Deney sonuçları ve analiz sonuçları Tablo 6' da gösterilmiştir. Deney sonuçlarıyla analiz sonuçlarının karşılaştırılması neticesinde, sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



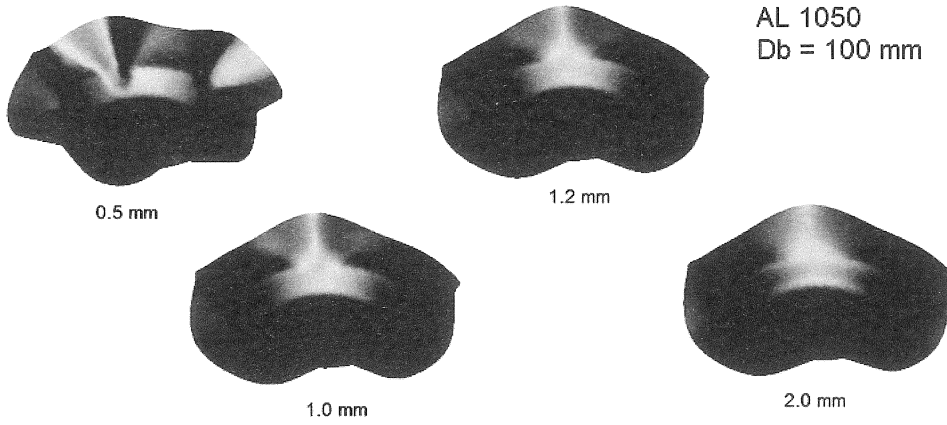
Şekil 4. Derin çekme işlemi sonrasında 80 mm, 90 mm ve 100 mm çaplarında ve 0.5 mm, 1.0 mm, 1.2 mm ve 2.0 mm kalınlıklarındaki Deney Parçaları



Şekil 5. 80 mm Çapındaki Parçaların Buruşma Oluşumları



Şekil 6. 90 mm Çapındaki Parçaların Buruşma Oluşumları



Şekil 7. 100 mm Çapındaki Parçaların Buruşma Oluşumları

Tablo 6. Belirtilmiş Kalınlık ve ap Değerlerindeki Malzemelerin Deney ve Analiz Sonuçları

Parça apı	Deney Sonuçları				Analiz Sonuçları			
	Dalga Sayısı				Dalga Sayısı			
Kalınlık [mm]	0.5	1.0	1.2	2.0	0.5	1.0	1.2	2.0
80 mm	10	8	8	-	8-10	8	8	-
90 mm	8	4	4	4	8	6	4	4
100 mm	5-7	4	4	2	6	4	4	4

SONUÇ

Bu çalışmada baskı plakası kuvveti değiştirilerek derin çekme simulasyonları yapılmıştır. 1 N ve 10000 N arası baskı plakası kuvvetleri uygulanarak, baskı plakası kuvvetinin buruşmaya olan etkisi araştırılmıştır. Baskı plakası kuvveti olmadan yapılan analizlerde sac metal flan bölgesinde 4 dalga görülmüştür. Analizler sonucunda, baskı plakası kuvveti arttırıldığında dalga sayısının arttığı ve dalga boyutunun azaldığı gözlemlenmiştir. 6500 N ve 6750 N baskı plakası kuvvetlerinde flan bölgesinde en fazla 24 dalga görülmüştür. 1 mm kalınlığındaki derin çekme özelliğindeki elik parçanın buruşmasını engellemek için 7000 N baskı plakası kuvveti yeterli görülmüştür.

Çekme derinliğinin buruşmaya olan etkisi 1 N, 1000 N ve 3000 N baskı plakası kuvvetleri için incelenmiştir. Kuvvet 1 N iken parça çekme derinliği 5 mm olmadan buruşma yaşamıştır. Ama buruşma 1000 N baskı plakası kuvveti uygulandığında 10 mm çekme derinliğine kadar görülmemiştir. Çekme derinliği arttırıldığında buruşmayı engellemeye yetecek baskı plakası kuvveti artma eğilimi göstermiştir.

Anizotropinin buruşmaya etkisi incelenmiştir. Baskı plakası kuvveti 1000 N olarak uygulandığında isotropik malzemede 12 dalga görülürken, anizotropik malzemede ise 10 dalga görülmüştür (Bkz. Tablo 4). Malzeme izotropik seçildiğinde elde edilen dalga sayıları 4 ve 4'n katlarıdır.

12 mm çekme derinliğinde, 1000 N, 5000 N ve 10000 N baskı plakası kuvvetleri için derin çekme enerjilerinin aynı olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 3). 1000 N kuvvet için 12 mm zımba ilerlemesinden sonra derin çekme enerjisinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu noktada buruşma enerjisinin derin çekme enerjisinden daha küçük olduğu ve parçanın daha düşük enerjide Őekillendięi sonucu çıkarılabilir. 5000 N baskı plakası kuvvetinde ise plastik enerjideki düşüş 25 mm çekme derinliğinde gözlemlenmiştir. 1000 N ve 5000 N kuvvetlerinde, malzeme buruşma yaşamıştır çünkü malzeme düşük

enerjiyi seçer ve düşük enerjide Şekillenir. Baskı plakası kuvveti 10000 N olduğunda malzemenin enerjisinde bir düşme görülmemiştir. Bu açıdan bakıldığında, 10000 N baskı plakası kuvvetinin buruşmayı engellemede yeterli olduğu gözlemlenmiştir.

Derin ekme deneyi, buruşmanın kalınlığı az olan malzemeler için daha önemli bir problem olduğunu göstermiştir. 80 mm çapındaki ve 0.5 mm kalınlığındaki parçada hem deneyde hem de analizde flan bölgesinde 10 dalga görülmüştür. Aynı apdaki 2.0 mm kalınlığındaki parçada ise buruşma görülmemiştir. Derin ekme deneyi ve analizleri göstermiştir ki, parça çapı arttıca dalga sayısı azalmıştır. 0.5 mm sac kalınlığı için, 80 mm çapındaki parçada 10 dalga görülürken, 100 mm çapındaki parçada dalga sayısı 6' ya düşmüştür. Deney ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların uyumlu olduğu gzlemlenmiştir.

ANALYSIS AND MODELING OF PLASTIC WRINKLING IN DEEP DRAWING

In this study, wrinkling in deep-drawing is investigated by utilizing a commercial finite element program. In order to understand plastic wrinkling, the effect of blank holder force is investigated. Axisymmetrical numerical models of a cup are investigated with different blank holder forces. Wrinkling instability is illustrated in energy diagrams of the process. Effect of anisotropy on wrinkling is also discussed by comparing isotropic and anisotropic numerical experiments with the material as steel. Besides numerical analysis, experimental verification is also conducted as conventional deep drawing operation by a hydraulic press. The wave formations of different sized blanks with four different thicknesses are illustrated.

Keywords: Wrinkling, Deep Drawing, Finite Element Method, Sheet Metal Forming, Blank Holder Force

KAYNAKÇA

1. Johnson W., Mellor P.B., "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Ltd., 1983.
2. Metal Forming Handbook, Schuler, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
3. Grote K.-H., Antonsson E.K., "Springer Handbook of Mechanical Engineering", 2008.
4. Banabic, D.; Bunge, H.-J.; Pöhlandt, K.; Tekkaya, A. E.: Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/ New York/ Tokyo, 2000.
5. A. E. Tekkaya: Finite Element Analysis in Solid Mechanics, Lecture Notes, Middle East Technical University, Ankara, 2002
6. Önder İ.E., "Assessment of sheet metal forming processes by numerical experiments", Ph.D Thesis, Middle East Technical University, Mechanical Engineering Department, Ankara, May 2005.
7. NUMISHEET 2002 Benchmark A: Deep Drawing of Cylindrical Cup, NUMISHEET 2002, *Proceedings of the Fifth International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes*, Jeju Island, Korea, October 21-25, 2002.
8. Kaftanoğlu B., "Plastic Analysis of Flange Wrinkling in Axisymmetrical Deep-Drawing". *Proceedings of the 21st International Machine Tool Design and Research Conference*, 1980, pp.21-28.

EKLER

Sembol Listesi

E	: Elastisite Modülü
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poissons Oranı
ϵ_0	: Çekme Gerinimi
ϵ	: Gerinim
σ	: Gerilim
K	: Mukavemet Katsayısı
n	: Gerinim Sertleşme İndisi
$R(0^\circ)$: Akma Yönündeki Anizotropi
$R(45^\circ)$: Akma Yönüne 45° olan Anizotropi
$R(90^\circ)$: Akma Yönüne 90° olan Anizotropi
Db	: Parça Çapı
Rb	: Parça Radüsü
t	: Malzeme Kalınlığı

Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi

Berkay Şanay
Mak. Yük. Müh.
Aselsan A.Ş.
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.

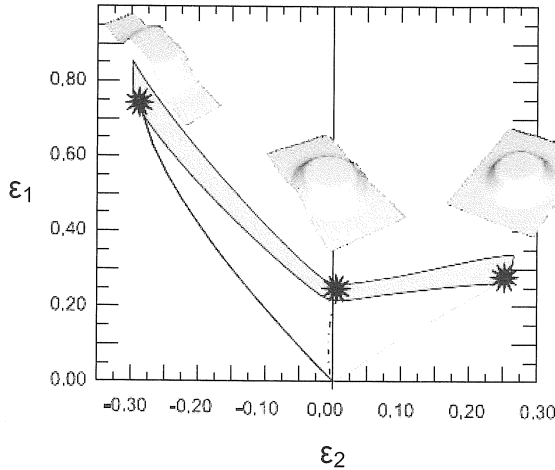
ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bu çalışmada Nakazima testi ile elde edilen Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) bir sonlu elemanlar yazılımı ile simülasyonu yapılarak tahmin edilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonunda sınır gerinmeleri ölçmek için gerinim yayılma kriteri kullanılmıştır. İki farklı anizotropik malzeme, AA2024-O ve SAE 1006, çalışma boyunca ŞSD'lerin değerlendirilmesinde ele alınmıştır ve her malzeme için 7 farklı numune geometrisi incelenmiştir. ŞSD'ler ayrıca, gerinim yayılma kriteri dışında teorik yaklaşımlar, Keeler, maksimum yük, Swift-Hill ve Storen-Rice kriteri, ile de tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda elde edilen ŞSD'ler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şekillendirme Sınır Diyagramı, Sac Metal Şekillendirme, Nakazima Testi, Gerinim Yayılması, Sonlu Elemanlar Yöntemi

GİRİŞ

Sac metal şekillendirme işleminin bir bozukluk olmadan kontrol edilebilmesi için, güvenli, kritik ve kusurlu şekillendirme bölgelerini gösteren bir diyagram kullanılır. Bu diyagram Şekillendirme Sınır Diyagram'ı (ŞSD) olarak tanımlanır (Şekil 1). Sac metal endüstrisi ve çalışmalarında sıkça kullanılan bu yöntem, sac metallerin şekillendirilebilirliğinin belirlenmesinde en önemli araçlardan biri olarak kabul edilir. Her sac metalin kendi şekillendirilebilirliğini, gerinme limitlerini ve şekillendirme bölgelerini belirten bir ŞSD vardır.



Şekil 1. Şekillendirme sınır diyagramı

Yalnız kayma geriniminden eşit iki eksenli gerinmeye kadar değişen gerinme oranları için ŞSD çizilir. Gerinim oranı pozitif olduğunda, yani ikincil gerinme pozitif olduğunda, malzemede germe meydana gelmiş demektir. Negatif gerinim oranında ise, yani ikincil gerinme negatif olduğunda, çekmenin meydana geldiği söylenebilir. Bunlara ek olarak, diyagramda çizilen gerinmeler gerçek gerinmelerdir.

Sac metallerdeki kararsızlıkları analiz etmek ve ŞSD'leri oluşturmak için birçok deneysel ve teorik yaklaşım bulunmaktadır.

Farklı malzemelerin ŞSD'lerini elde edebilmek için literatürde çok sayıda deneysel yöntem sayılabilir. Tek eksenli çekme testi, hidrolik şişirme testi, zımbayla germe testi, Keeler testi, Hecker testi, Marciniak testi ve Nakazima testi bunlardan bazılarıdır [1]. Yukarıda belirtilen tüm bu testler içinden Nakazima testi en etkili ve en faydalı test olarak değerlendirilebilir. Bunun nedeni, test için kullanılan araçların basit olması, test edilecek numune geometrilerinin karmaşık olmaması ve ŞSD'nin tüm alanının belirlenebilir olmasıdır. Bugün Nakazima testi sac metallerin şekillendirme limitlerinin belirlenmesinde endüstride ve sac metal test laboratuvarlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Sac metal şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesi için yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalara ek olarak birçok araştırmacı, ŞSD'nin tahmin edilmesi üzerine teorik ve analitik çalışmalar yapmıştır. İlk olarak bazı teorik modeller geliştirilmiştir [2-3]. Sonradan, daha kesin teorik metotlara ihtiyaç duyulmuştur. Genellikle, teorik ve nümerik olarak ŞSD'nin belirlenmesi temel olarak

yerelleşme kriterine dayandırılmıştır. Maksimum yük prensibi [4-5], çatallanma analizi [6-8], sınır gerilim analizi [9-11] ve gerinim yayılmasını [12] temel alan yerelleşme kriterleri sakıncaları ve sınırlamalarıyla birlikte literatürde bulunmaktadır. Önerilen metodların uygunluğu birçok malzeme için incelenmiştir ve yeni yaklaşımlar teknolojinin ilerlemesiyle halen geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, sac metallerin şekillendirilebilirliği, ticari bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımı kullanılarak Nakazima testi simülasyonu ile tahmin edilmiştir. Kaftanoğlu'nun [12] gerinim yayılma kriteri, sonlu elemanlar çözümünden şekillendirme sınır gerinmelerini bulmada kullanılmıştır. Ayrıca, ŞSD'ler teorik olarak Swift-Hill [4-5], Storen-Rice [6-8], Keeler [2-3] ve maksimum yük [12] kriterleri ile de elde edilmiştir. Tüm analizlerde, Alüminyum (AA2024-O) ve Çelik (SAE 1006) malzemeler için malzemedeki anizotropi hesaba katılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve teorik modellerin ve sonlu elemanlar yöntemi çözümünün geçerliliği tartışılmıştır.

TEORİK MODELLER

Maksimum Yük Kriteri

Bu kriter, herhangi bir kesitteki net yükün zamanla maksimuma ulaştığındaki gerilim ve gerinme durumlarını, ölçüsel değişimleri de hesaba katarak inceler [12].

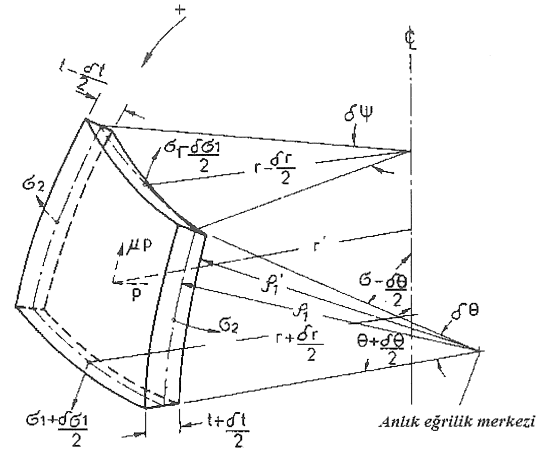
Gererek şekillendirme işleminde, Şekil 2(a)'da gösterildiği gibi büyük bir kabuk elemanı ele alınmıştır.

Orta yüzeye tanjant yönünde $\partial\psi$ açısı olan bir dilim tarafından karşılanan yük:

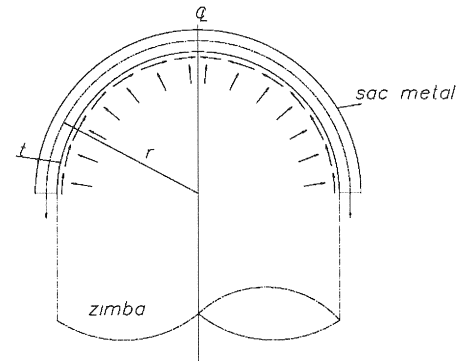
$$Q = 2\pi r \sigma_{1r} t \cdot \frac{\partial\psi}{2\pi} \quad (1)$$

(1) numaralı denklemde, Q yükü, r merkezden kabuk elemanın duvarına olan anlık yarıçapı, σ_{1r} dairesel gerilimi, t ise malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

Maksimum yük kriterini kullanarak sınır gerinmelerini elde etmek için sonlu elemanlar çözümünden belirlenen boyun vermiş kritik elemanın yük-zaman grafiği çizilir ve Şekil 3'teki gibi tepe noktası olan bir eğri elde edilir. Matematiksel olarak eğrinin tepe noktası, (1) numaralı denklemin ilk türevinin sıfır olduğu noktayı temsil eder. Bu çalışmada (1) numaralı denklemdeki bilinmeyenler, sonlu elemanlar analizinden elde edilmiştir.

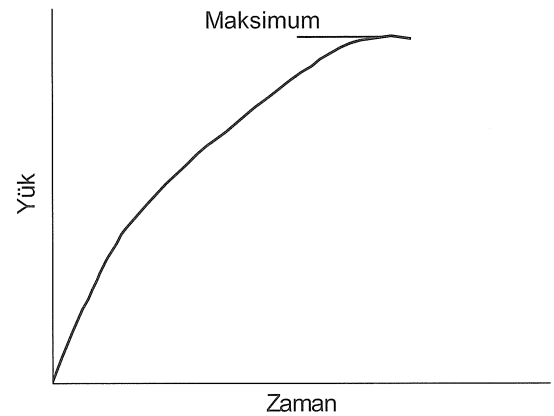


(a)



(b)

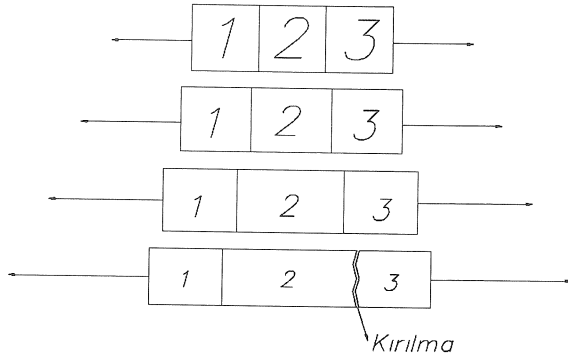
Şekil 2. Gererek şekillendirme işlemi, (a): kabuk eleman duvarının üzerindeki gerilmeler [13], (b): yarıküresel zimba ve sac metal



Şekil 3. Yük-zaman grafiği

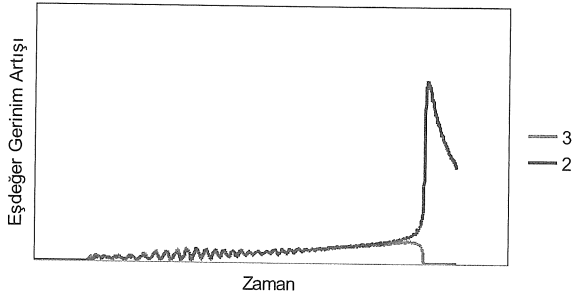
Gerinim Yayılma Kararsızlığı

Kaftanoğlu'na [12] göre, plastik olarak deforme olan bir cisimdeki herhangi bir noktada, gerinim ve gerilme durumu aynı zamanda komşu noktadaki gerinim ve gerilmelere bağlıdır. Eğer malzeme bu noktalarda kararlı olmayı sürdürüyor ve kırılmıyorsa, ne kadar olursa olsun, bu noktalardaki herhangi bir gerinme artışı diğer noktalardaki gerilmelerin de artmasına neden olur. Ancak her noktanın birbirinden farklı belirli bir sınır gerinmesi vardır. Bu sınır gerinmesine ulaşıldıktan sonra bir noktadaki gerinme artışı komşu noktadaki gerinmenin daha fazla artmasına neden olmaz. Etkin biçimde gerinim yayılması durur ve bir noktadaki gerinme artış oranı sonsuza gider ve daha sonra burada kırılma görülür (Şekil 4).



Şekil 4. Gerinim yayılması

Gerinim yayılma kararsızlığı, sert bir zımbayla gerekerek şekillendirme işleminde parçanın herhangi bir tarafında görülebilir ve sürtünme ve gerinme geçmişinden etkilenir. Şekil 5'te görüldüğü gibi (2) ve (3) numaralı elemanların (Şekil 4) eşdeğer gerinme artışları bir noktaya kadar kademeli olarak artmaktadır. Ancak bir noktadan sonra boyun veren elemanın (2 numaralı eleman) gerinme artışı hala pozitif olup artmaya devam etmektedir; ancak komşu elemanın (3 numaralı eleman) eşdeğer gerinme artışı aniden sıfıra düşmektedir. Bu, elemanlar arasında kırılma meydana gelmesiyle sıfıra ulaşılan noktada daha fazla gerinme transferi gerçekleşmediği anlamına gelir.



Şekil 5. Eşdeğer gerinim artışı-zaman grafiği

Bu kriteri basit bir matematiksel formül ile ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle, elemanların gerinme geçmişleri sonlu elemanlar analizi simülasyonu ile izlenmiş ve sınır gerinmeleri tahmin edilmiştir.

Swift-Hill Modeli

Swift [4], pozitif gerinme oranı artışı aralığındaki plastik gerinme kararsızlığı ile ilgili bir koşul geliştirmiştir. Plastik kararsızlık, yayılmış boyun verme halinde gerçekleşir ve ŞSD'nin sağ tarafı belirlenir. Bu teoriye göre sınır gerinmeler şu şekilde verilmiştir:

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)^2} n \quad (2)$$

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)^2} n \quad (3)$$

(2) ve (3) numaralı denklemlerde σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri, f akma fonksiyonunu, n pekleşme üstelini, ε_1^* ve ε_2^* ise sınır gerinmelerini ifade etmektedir.

Hill [5], sac metallerdeki bölgesel boyun vermeyi gerilim ve gerinmelerdeki düzensizlikleri ele alarak incelemiş ve yerleşmiş kararsızlık analizini yayınlamıştır. Bölgesel boyun verme, yalnızca karakteristik yönler uzama olmayan yönde ise gerçekleşir. Bu nedenle, bölgesel kararsızlık sadece gerinme oranı artışının negatif olduğu durumda; yani ŞSD'nin sol tarafında meydana gelebilir.

Hill teorisine göre sınır gerinimleri şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\varepsilon_1^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2}} n \quad (4)$$

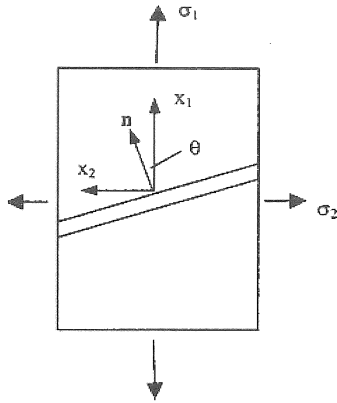
$$\varepsilon_2^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2}} n \quad (5)$$

Storen-Rice Modeli

Storen ve Rice [6] plastik kararsızlık halini, bölgesel boyun vermenin baştan tekbiçimli ve homojen saclarda meydana geldiğini varsayarak

incelemiştir. Tüm ŞSD boyunca bölgesel boyun vermeyi, J2 plastisite deformasyon teorisini Hill'in klasik çatallanma analizi ile birleştirerek tahmin etmişlerdir.

Akma alanındaki noktasal tepe modelini sadeleştirerek ele almış ve aynı zamanda deformasyon teorisi denklemlerini, tüm aktif gerilim artışları için uygulamışlardır. Bölgesel boyun verme iki eksenli gerilmiş saclarda deneysel olarak gözlemlenir. Bulunan sonuçlar, plastik akım esnasında akma alanındaki tepe oluşumu hipotezini desteklemektedir. Düzenli akma alanını kullanan akma teorilerinde, boyun vermenin homojen saclar için iki eksenli germe işleminde oluşamayacağı da belirtilmiştir.



Şekil 6. Bölgesel boyun verme bandı

Chow ve Ji [8], Storen ve Rice [6] tarafından geliştirilen tepe teorisini daha basit hale getirmiş ve daha genelleştirilmiştir. Bölgesel boyun verme koşulunu ve şekillendirme sınır gerilmelerini Hill'in ikinci dereceli ve Hosford'un yüksek dereceli akma kriterini uygulayarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada Chow ve Ji'nin [8] formülasyonlarından yararlanılmıştır.

Keeler Modeli

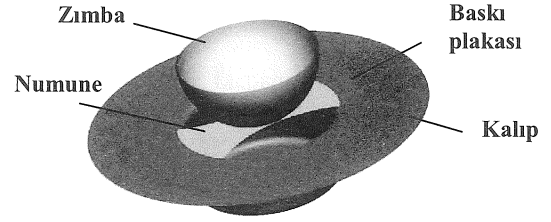
Bu modele göre [14], ŞSD düzlem gerinme durumundaki ϵ_{10} noktasından geçen iki doğru tarafından oluşturulur. Bu doğruların eğimleri ŞSD'nın sol ve sağ tarafları için sırasıyla 45° ve 20° 'dir. Bu model ŞSD'leri, deneysel ve teorik yaklaşımları basitleştirerek daha kolay bir biçimde tahmin etmek amacıyla atölyelerde kullanılmaktadır.

$$\epsilon_{10}(\%) = (23.3 + 14.13 \cdot t) \frac{n}{0.21} \quad (6)$$

Yukarıdaki (6) numaralı eşitlikte, t sac metalin mm olarak kalınlığı, ϵ_{10} mühendislik gerinmesi, n ise pekleşme üstelidir.

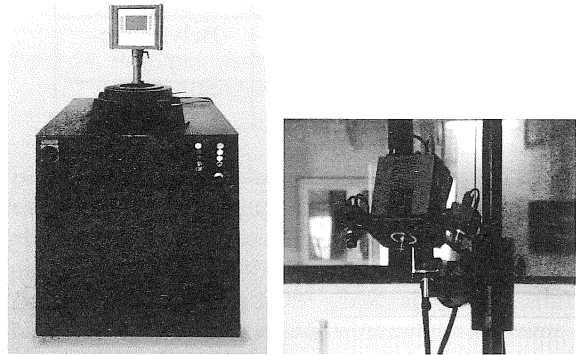
NAKAZIMA TESTİ

Nakazima testi sac metal malzemelerin ŞSD'lerini elde etmek için sıkça kullanılan deneysel metodlardan birisidir. Mümkün olduğu kadar geniş bir gerinme alanı elde etmek için birçok birincil ve ikincil gerinme çifti toplanır. Farklı gerinme kombinasyonları elde etmek amacıyla, birçok test numunesi değişen genişliklerde gerilir. Nakazima testi, numuneleri yarıküresel bir zımba ile dairesel bir kalıp üstüne çekme işlemiyle uygulanır (Şekil 7). Deneysel için, Şekil 8(a)'da gösterilen sac metal test tezgâhı kullanılır.



Şekil 7. Nakazima testi

Bugünün teknolojisi gerinmelerin belirlenmesinde daha kesin ve hızlı ölçüm araçları sunmaktadır. Şekil 8(b)'de görülen GOM/Aramis gibi optik bir ölçüm sistemi kullanarak numunelerin hazırlanması, şekillendirme işlemi ve deformasyonların belirlenmesi çok daha etkin bir biçimde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 8. (a): Zwick-Roell sac metal test makinesi, (b): GOM optik ölçüm sistemi

Nakazima testinde 7 adet test numunesi tek eksenli çekmeden eş iki eksenli çekme durumuna kadar gerilir. Test her numune için görülebilir bir boyun oluşana kadar devam ettirilir. Bu durumda, bozulan bölgenin yanındaki ana gerinmeler ölçülür. Her numune için ŞSD oluşturmak üzere bir veri noktası (birincil gerinme, ikincil gerinme) elde edilir. Bu prosedür 7 numune için de tekrarlandıktan sonra, ŞSD tamamen belirlenmiş olur.

SONLU ELEMANLAR SİMULASYONU

Nakazima testi simülasyonlarında, numunelerdeki sınır gerinimleri bulmak için gerinim yayılması kriteri kullanılmıştır. Ölçü alınacak elemanlar şu şekilde seçilmiştir:

- Boyun verme görülen bölgenin komşu elemanları, ölçülecek eleman olarak rastgele seçilmiştir.
- Ölçü alınacak komşu elemanların eşdeğer gerinim artışları bölgesel boyun verme meydana geldikten sonra 0 olmalı, boyun veren elemanların eşdeğer gerinim artışları ise pozitif olmalıdır.

Tablo 1'de bu çalışmadaki sonlu elemanlar simülasyonlarında kullanılan parametreler gösterilmiştir.

Tablo 1. İşlem Parametreleri

Yarıküresel zımba yarıçapı:	50mm
Kalıp köşe yarıçapı:	5mm
Kalıp iç yarıçapı:	105mm
Zımba hızı:	4mm/s
Baskı plakası kuvveti:	100kN
Sürtünme katsayısı:	0.08 [13]
Birleşme noktası sayısı:	9
Eleman tipi:	Belytschko-Tsay
Sacın eleman boyutu:	2mm

İki farklı malzeme için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde, Hollomon plastik akış kuralı seçilmiştir. Simülasyonlarda deneysel işlem parametreleri kullanılmıştır. Bundan sonraki bölümde SAE 1006 çeliği için örnek bir numunenin analizi anlatılmıştır.

SAE 1006 Analizi

Simülasyonu yapılan SAE 1006 sacının kalınlığı 0.58mm'dir. SAE 1006'nın kimyasal kompozisyonu ve malzeme özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3 'te gösterilmiştir.

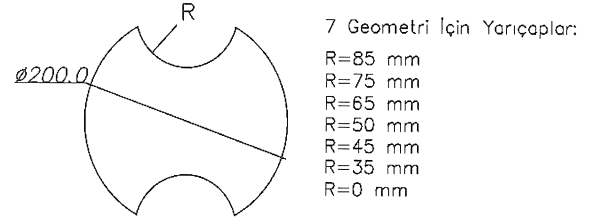
Tablo 2. SAE 1006 Kimyasal Kompozisyonu [16]

C%	Mn%	P%	S%	Fe%
<=0.08	<=0.45	<=0.25	<=0.15	kalan

Tablo 3. SAE 1006 Malzeme Özellikleri [15]

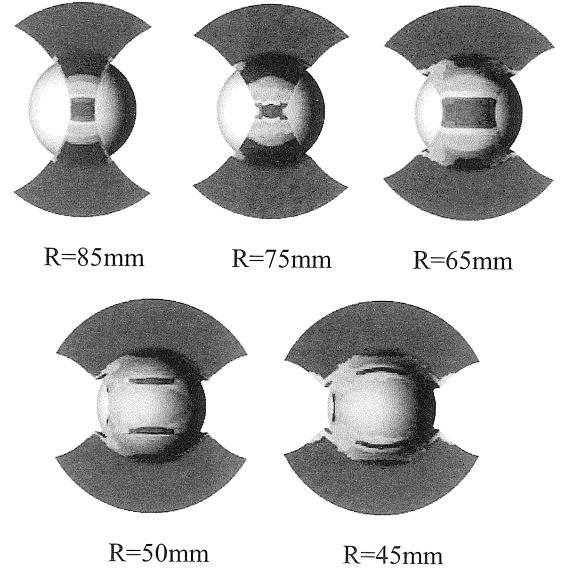
R_0	1.8
R_{45}	1.88
R_{90}	2.74
n	0.2609
E(GPa)	69.1
K(MPa)	580.86
UTS(MPa)	315.5
σ_y (MPa)	189.7
v	0.3
ρ (g/mm ³)	7.8e-6

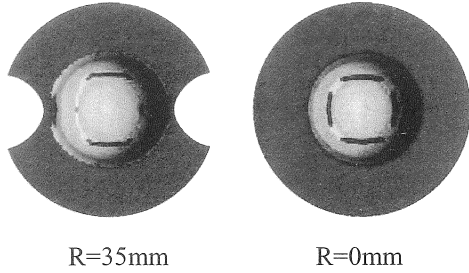
Toplamda, tek eksenli çekmeden iki eksenli çekme durumuna kadar olan 7 farklı numune test edilmiştir. Numunelerin geometrileri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. SAE 1006 çeliğinin Nakazima geometrisi

7 numunenin deforme olmuş durumları Şekil 10'da gösterilmiştir.

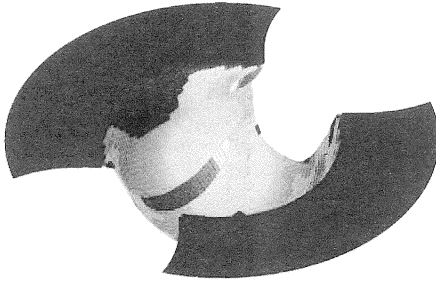




Şekil 10. SAE 1006 numunelerinin deforme olmuş durumları

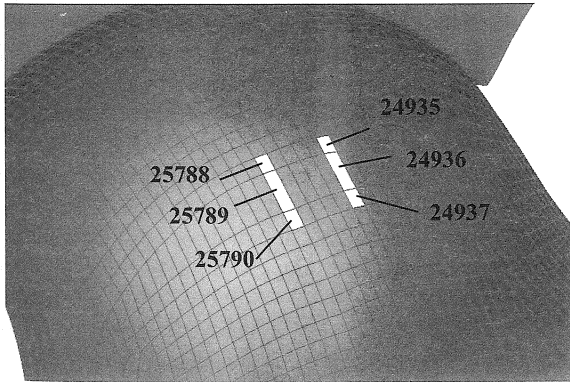
SAE 1006 Yarıçap=50mm Numunesi

Deforme olmuş R=50mm numunesinin geometrisi Şekil 11'de gösterilmiştir. Boyun veren elemanların, zımbanın yarıçapı boyunca oluştuğu görülmektedir.



Şekil 11. Deforme olmuş R=50mm numunesi

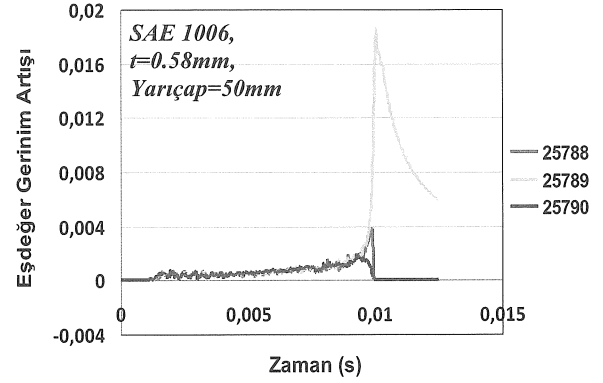
Numunede meydana gelen boyun vermiş bölge Şekil 12'de görülmektedir. Toplamda 6 tane referans eleman 2 grup halinde incelenmiştir. 1.grup 25788-25789-25790 numaralı elemanlar, 2.grup ise 24935-24936-24937 numaralı elemanlardır.



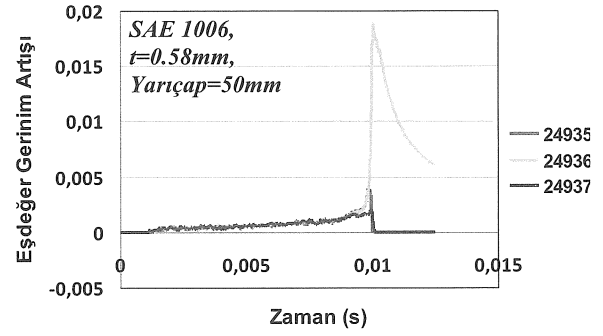
Şekil 12. R=50mm numunesi için referans elemanlar

Deformasyon devam ettikçe, tüm referans elemanlarının eşdeğer gerinim artışları izlenmiş ve kararsızlık anı bulunmuştur. Gerinim yayılması

prensibinde, gerinim artışının 0 olması kararsızlık anını temsil eder; çünkü komşu elemanlar arasında daha fazla gerinim transferi gerçekleşmemektedir. Şekil 13 ve 14'te iki grup referans elemanlarının eşdeğer gerinim artışlarının zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 13. R=50mm numunesinin 1.grup elemanları için eşdeğer gerinim artışı

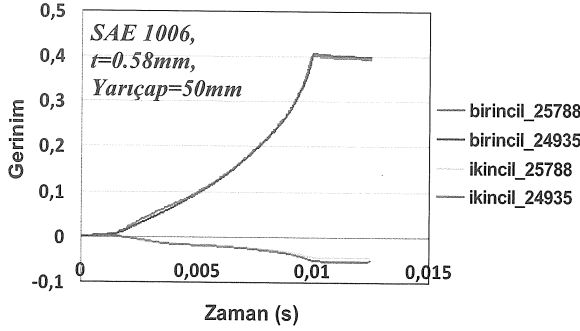


Şekil 14. R=50mm numunesinin 2.grup elemanları için eşdeğer gerinim artışı

Şekil 13'te de görüldüğü gibi, gerilme periyodunun başlangıcında, 1.gruptaki tüm elemanların eşdeğer gerinimleri zamanla yükselmektedir; çünkü tüm eşdeğer gerinim artışları pozitifdir. Ancak t=0.0093s anından sonra, 25790 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı azalmaya başlamıştır. 25788 numaralı elemanın da t=0.0098s anında gerinim artışının azaldığı görülmektedir. t=0.0099s anında belirtilen iki elemanın da eşdeğer gerinim artışları sıfıra gelmiştir. Oysaki 25789 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı hala pozitifdir. Eşdeğer gerinim artışının 0 olduğu anda, 25788 numaralı elemanın birincil ve ikincil gerinimleri kaydedilmiştir ve bu gerinimler ŞSD oluşturmak için R=50mm numunesinden elde edilen ilk sınır gerinim noktasıdır.

Şekil 14'te görüldüğü gibi, gerilme periyodunun başlangıcında, 2.gruptaki tüm elemanların eşdeğer gerinimleri zamanla yükselmektedir; çünkü tüm eşdeğer gerinim artışları pozitifdir. Ancak t=0.0099s

anından sonra, 24935 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı azalmaya başlamıştır. 24937 numaralı elemanın da $t=0.00995s$ anında gerinim artışının azaldığı görülmektedir. $t=0.01s$ anında belirtilen iki elemanın da eşdeğer gerinim artışları sıfıra gelmiştir. Oysaki 24936 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı hala pozitiftir. Eşdeğer gerinim artışının 0 olduğu anda, 24935 numaralı elemanın birincil ve ikincil gerinimleri kaydedilmiştir ve bu gerinimler ŞSD oluşturmak için $R=50mm$ numunesinden elde edilen ikinci sınır gerinim noktasıdır.



Şekil 15. $R=50mm$ numunesinin 1.grup referans elemanlarının birincil ve ikincil gerinimleri

Şekil 15'te SAE 1006 malzemesi için $R=50mm$ numunesinin asal sınır gerinim geçmişleri gösterilmiştir. Burada, bölgesel boyun vermenin meydana gelmesinden sonra, boyun vermiş referans elemanların birincil ve ikincil gerinimlerinin artık yükselmediği görülmektedir. Böylece, elemanlar arasında gerinim transferinin artık gerçekleşmediği sonucuna varılmaktadır.

AA2024-O Analizi

Simülasyonu yapılan alüminyum AA2024-O sacının kalınlığı $0.81mm$ 'dir. AA2024-O'nun kimyasal kompozisyonu ve malzeme özellikleri Tablo 4 ve Tablo 5 'te gösterilmiştir.

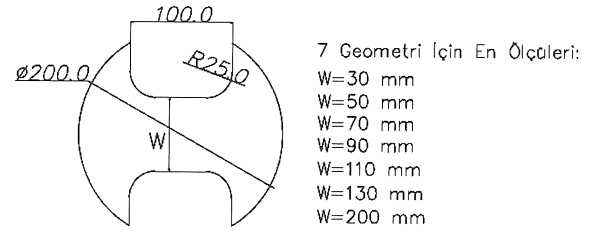
Tablo 4. AA2024-O Kimyasal Kompozisyonu [17]

Si%	0.5
Fe%	0.5
Cu%	3.8-4.9
Mn%	0.3-0.9
Mg%	1.2-1.8
Cr%	0.1
Zn%	0.25
Ti%	0.15
Belirtilmeyen diğer elementler %	0.15
Al%	kalan

Tablo 5. AA2024-O Malzeme Özellikleri [15]

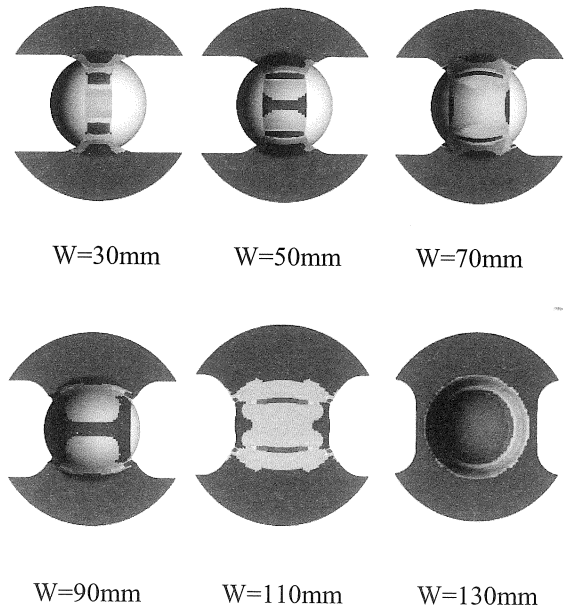
R_0	0.59
R_{45}	0.8
R_{90}	0.73
n	0.2528
E(GPa)	59.4
K(MPa)	344.37
UTS(MPa)	176.81
σ_y (MPa)	69.59
ν	0.33
ρ (g/mm ³)	2.73e-6

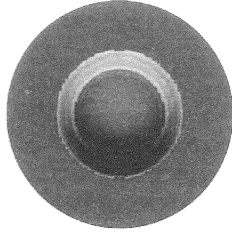
Tek eksenli çekmeden iki eksenli çekme durumuna kadar olan 7 farklı numune, SAE 1006 malzemesinde olduğu gibi test edilmiştir. Numunelerin geometrileri, sanayi kuruluşunun farklı standard kullanması nedeni ile çelik numunelerden farklı olarak Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Alüminyum Nakazima geometrisi

Toplamda 7 numunenin deforme olmuş durumları Şekil 17'de gösterilmiştir.

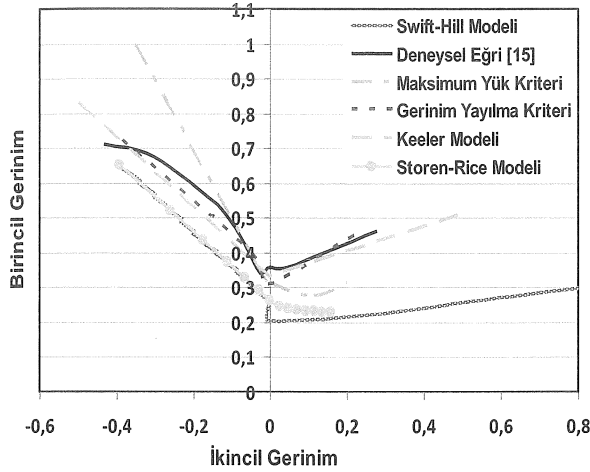




W=200mm

Şekil 17. AA2024-O numunelerinin deforme olmuş durumları

Tahmin Edilen Şekillendirme Sınır Diyagramları



Şekil 18. SAE 1006 için ŞSD'ler

Şekil 18'de SAE 1006 çeliği için tahmin edilen şekillendirme sınır eğrileri gösterilmiştir. Özellikle ŞSD'nin sağ tarafı için, sadeleştirilmiş Keeler modeli oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Her ne kadar, Keeler formülasyonu yalnızca malzeme kalınlığına ve pekleşme üsteline bağlı olsa da, elde edilen sonuç kayda değerdir.

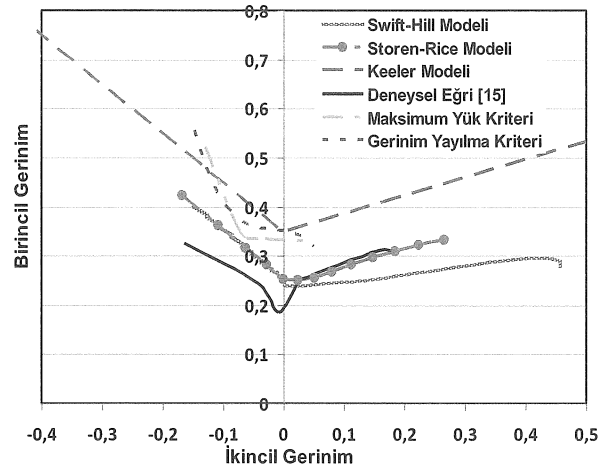
Hollomon'un sertleşme denkleminin kullanıldığı Swift-Hill modeli ise deneysel eğrinin altında sonuçlar vermiştir. Diyagramın sol tarafında deney sonucu ile benzeşme biraz daha fazla; ancak sağ tarafında çok az olduğu görülmüştür.

Storen-Rice modelinden de Swift-Hill modelinde olduğu gibi SAE 1006 için sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Genelde, ikincil gerinimin negatif olduğu bölgeden pozitif olduğu tarafa geçilirken şekillendirme eğrisinde yükselen bir davranış beklenir; ancak böyle bir davranış Storen-Rice modeli sonucunda görülemedi. Sonuç olarak, bu model de şekillendirme sınırlarını düşük göstermiştir.

Maksimum yük kriteri kullanılarak bulunan şekillendirme eğrisi düz gerinim durumunda benzer bir davranış göstermiştir. Tek eksenli çekme

durumundan düz gerinim durumuna geçişte birincil gerinimde sert bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni R=65mm numunesinde elde edilen birincil sınır geriniminin 0.999 olması ve R=50mm numunesi için 0.375 olmasıdır. Buna ek olarak R=75mm ve R=85mm numuneleri için çok yüksek sınır gerinimleri elde edildiğinden eğriye dâhil edilememiştir.

Gerinim yayılması kriteri ile tahmin edilen şekillendirme sınır eğrisinin, tüm eğriler arasındaki en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Şekil 18'de görüldüğü gibi ŞSD'nin sağ tarafı deneysel sonuçla neredeyse çakışık bulunmuştur. ŞSD'nin sol tarafında ise, düzlem gerinim durumundan tek eksenli gerilmeye doğru ilerlerken, tahmin edilen eğri deneysel eğriye oldukça yakın bir davranış göstermektedir. Sonuç olarak, gerinim yayılma kriteri sonlu elemanlar analizi ile beraber uygulanırsa, SAE 1006 çeliğine benzer özellikteki malzemeler için çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 19. AA2024-O için ŞSD'ler

AA2024-O malzemesi için tahmin edilen eğriler Şekil 19'da incelendiğinde tüm tahmin metodlarının şekillendirme limitlerinin üzerinde sonuçlar verdiği görülmüştür.

Keeler modeli, birincil gerinim değerlerini neredeyse deneysel sonucun 2 katı olarak tahmin etmiştir ve güvenilir bir tahmin elde edilememiştir.

Hollomon'un sertleşme denkleminin kullanıldığı Swift-Hill modeli de AA2024-O için Keeler modelinden daha iyi; ancak şekillendirme limitlerinin üzerinde bir tahmin yapmıştır. Grafiğin sağ tarafında birincil gerinim 0.23 iken Swift-Hill eğrisi ve deneysel eğrisinin kesiştiği görülmektedir. Swift-Hill modeli, diyagramın sol tarafında şekillendirme limitlerinin altında; sağ tarafında ise üzerinde bir tahmin yapmıştır.

Storen-Rice modelinin Swift-Hill modeline yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. diyagramın sol tarafında eğri, Swift-Hill eğrisiyle çakışık; sağ

tarafında ise deneysel sonuca oldukça yakındır. AA2024-O için Storen-Rice modeli SAE 1006 çeliğinden daha iyi sonuç vermiştir.

Deneysel sonuç ile karşılaştırıldığında maksimum yük kriteri de diğer kriterler gibi şekillendirme limitlerinin üzerinde bir sonuç vermiştir ve daha önceden belirtildiği gibi bazı numuneler için sınır gerinmeler bulunamamıştır.

AA2024-O malzemesi için, gerinim yayılma kriteri kullanılarak yapılan tahminde de diğer metotlar gibi tatmin edici bir sonuç bulunamamıştır. Maksimum yük kriterinde olduğu gibi yalnızca 4 numune için sınır gerinmeler elde edilebilmiştir. Şekil 19'da gösterildiği gibi diyagramın hem sol ve hem de sağ tarafında şekillendirme limitleri deney sonucunun üzerinde tahmin edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerinim yayılması kriteri kullanılarak AA2024-O malzemesine benzer özellikteki malzemeler için sağlıklı sonuçlar elde edilemeyebilir.

SONUÇ

Bu çalışmada sac metallerin şekillendirilebilirliği, özellikle gerilme nedeniyle meydana gelen bozulmalar, teorik ve nümerik metotlarla tahmin edilmiştir. ŞSD'lerin belirlenmesi için Nakazima testi yönteminin, gerinim yayılma kriterinin sonlu elemanlar yöntemine uygulanması ile simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca, Swift-Hill, Storen-Rice, Keeler, ve maksimum yük kriterleri de SAE 1006 çeliğinin ve AA2024-O alüminyumunun şekillendirme sınır eğrilerinin bulunmasında kullanılmıştır. Tahmin edilen ŞSD'leri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

SAE 1006 çeliği için farklı geometrideki 7 numune, sonlu elemanlar yöntemi ile başarıyla analiz edilmiş ve boyun verme bölgeleri açık bir şekilde görülmüştür. Şu sonuçlar çıkarılabilir:

- ŞSD'yi tahmin etmek için en uygun kriter, Şekil 18'de görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerinim yayılma kriteridir.
- Keeler modeli de deneysel sonuçla uyum içinde olduğu görülmüştür.
- SAE 1006 için Swift-Hill, Storen-Rice ve maksimum yük kriteri kullanılarak tahmin edilen ŞSD'lerin şekillendirme sınırlarının altında sonuçlar verdiği bulunmuştur. Bu metotlar, SAE 1006 benzeri malzemeler için güvenilir sonuçlar vermeyebilirler.

AA2024-O alüminyumunu için 7 farklı numune arasından plastik kararsızlık ya da boyun verme, en ölçüsü 90mm, 130mm ve 200mm olan numuneler için elde edilememiştir. Bu nedenle, ŞSD'nin tüm alanı, gerinim yayılması ve maksimum yük kriterleri kullanılarak elde edilememiştir. Aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Şekil 19'da da görülebileceği gibi hiçbir yöntem şekillendirme sınırlarını tamamen belirleyememiştir.
- Swift-Hill ve Storen-Rice modelleri özellikle ŞSD'nin sağ tarafı için yakın sonuçlar vermiştir.
- Keeler modeli, maksimum yük kriteri ve gerinim yayılma kriteri AA2024-O için şekillendirme sınır limitlerinin üzerinde sonuçlar vermiştir.
- Daha önce de vurgulandığı üzere, bazı numuneler için bölgesel boyun verme gözlenmemiştir. Bunun nedeni, AA2024-O malzemesinin malzeme özellikleri (n , R_0 , R_{45} , R_{90}), sonlu eleman boyutu ya da sürtünme koşulları olabilir.

Son olarak, çalışma boyunca şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Şekillendirme sınırlarını teorik olarak tahmin etmek, incelenen malzemenin cinsine oldukça bağlıdır. Ayrıca, bu teorik modeller birçok varsayımı içerdiğinden, dikkatli kullanılmalıdır.
- Gerinim yayılma kriteri, çok daha farklı malzemelerin sınır gerinmelerini bulmada kullanılıp geçerliliği deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalıdır.
- Bugünün gelişmiş sonlu elemanlar analiz yöntemlerini şekillendirme sınırlarının tahmininde kullanmak, deneysel yöntemlerde harcanan malzeme ve zaman kayıplarını büyük oranda azaltabilir. Kullanılan sürtünme katsayıları yaklaşık olup deneylerden veya simülasyonlardan bulunmaktadır. Bu nedenle teori ve uygulama arasında küçük farklar olabilir.
- Herhangi bir imalat yöntemi için, uygun malzeme ve işlem parametreleri seçimi başarılı sonuçlar almak için çok önemlidir.

PREDICTION OF PLASTIC INSTABILITY AND FORMING LIMITS IN SHEET METAL FORMING

In this study, FLD's are predicted by simulating Nakazima test using a commercial finite element software. Strain propagation criterion is used to evaluate the limit strains from the finite element simulations. Two different anisotropic materials, AA2024-O and SAE 1006, are considered throughout the study and for each material, 7 different specimen geometries are analyzed. Furthermore, FLD's are predicted by theoretical approaches namely; Keeler's model, maximum load criteria, Swift-Hill model and Storen-Rice model. At the end of the study, the

obtained FLD's are compared with the experimental results.

Keywords: Forming Limit Diagram, Sheet Metal Forming, Nakazima Test, Strain Propagation, Finite Element Method

TEŞEKKÜR

Yazarlar, ATILIM Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve araştırma görevlisi Gökhan Çelik'in sağladığı destek için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Banabic, D.; Bunge, H.-J; Pöhlandt, K.; Tekkaya, A. E.: Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/ New York/ Tokyo, 2000.
2. Keeler, S., P., and Backhofen W., A., Trans.ASM, 1963, vol.56, pp.25-48.
3. Keeler, S., P., Sheet Met. Ind., 1965, vol.42, pp. 683-91.
4. Swift, H., W., "Plastic Instability Under Plane Stress", J. Mech. Phys. Solids, 1 1952, pp. 1-18.
5. Hill, R., J. Mech. Phys. Solids, 1952, vol.1, pp. 19-30.
6. Storen, S., Rice, J., R., "Localized Necking in Thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, 1975, vol.23, pp.421-41.
7. Zhu, X., Weinmann, K., and Chandra, A., "A Unified Bifurcation Analysis of Sheet Metal Forming Limits", ASME J. Eng. Mater. Technol., 2001, 123, pp. 329-333.
8. Chow, C., L., Jie, M., Hu, S., J., "Forming Limit Analysis of Sheet Metals Based on a Generalized Deformation Theory", Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME 2003; 125; 260-5. Johnson W., Mellor P.B., "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Ltd., 1983.
9. Sing, W., M., Rao, K., P., Swaminathan, K., "Influence of Limit Stress States and Yield Criteria on the Prediction of Forming Limit Strains in Sheet Metals", Metallurgical and Materials Transactions 1997, 28A (11), 2323-33.
10. Sing, W., M., Rao, K., P., "Role of Strain-Hardening Laws in the Predictions of Forming Limit Curves", Journal of Materials Processing Technology 63, 1997, 105-110.
11. Sing, W., M., Rao, K., P., "Study of Sheet Metal Failure Mechanism Based on Stress-State Conditions", Journal of Materials Processing Technology 67, 1997, 201-206.
12. Kaftanoğlu, B., Alexander, J.M., "On Quasistatic Axisymmetrical Stretch Forming", International Journal of Mechanical Sciences, 12, 1970, 1065-1080.
13. Kaftanoğlu, B., "Determination of Coefficient of Friction Under Conditions of Deep-Drawing and Stretch Forming", Wear, 25, 1973, 177-188.
14. Keeler, S., P., Brazier, W., G., "Relationship Between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability", Micro Alloying, 1975, 21-32.
15. Metal Forming Center of Excellence-Atılım University, Ankara, TURKEY.
16. "ASM Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", ASM International Handbook Committee, USA, 1992.
17. "ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys", ASM International Handbook Committee, USA, 1993.

Gökhan Çelik
Arş. Gör.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Celalettin Karadoğan
Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Celal Onur Alkaş
İmalat Mühendisi

Som Cıvata Somun
San. Ve Tic. A.Ş.
Ankara

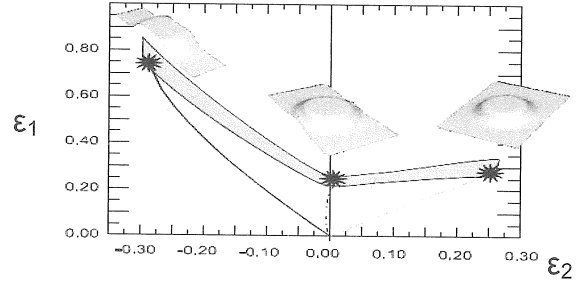
AA2024 Alüminyum Alaşımı için Şekillendirilebilme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi

Sac metal şekillendirme; uzay, havacılık ve otomotiv gibi birçok önemli sanayide kullanılan en önemli teknolojilerden birisidir. Müşteri talepleri, kalite, güvenlik ve pazar rekabeti gibi birçok konuda gereksinimlerin karşılanabilmesi amacıyla; sac metal şekillendirme operasyonları işlem öncesinde iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bu çalışmada, maliyet ve kalite gibi unsurları da değerlendirerek sac metal operasyonlarının geliştirilmesi için, (SEA) Sonlu Elemanlar Analizi ile mekanik malzeme karakterizasyonunu kombinasyonu kullanılmıştır. Mekanik malzeme karakterizasyonu konusunda, tek yönlü çekme ve hidrolik şişirme testleri yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri için, GOM-Aramis optik sistemi kullanılmıştır. Çalışmalar esnasında AA2024 alaşımı seçilmiştir. Şekillendirmeyi etkileyen parametreler olarak, malzeme ilk kalınlığı, yağlayıcılar ve gerinim oranı (zımba hızı) üzerinde çalışılmıştır. SE analizi; deneysel ortamın simule edilmesi ve farklı yağlama koşullarında etki edecek olan sürtünme katsayısının elde edilmesi için kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal simülasyon sonuçlarında iyi bir bağıntı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Şekillendirilebilirlik Diyagramı, Sonlu Elemanlar Analizi, Optik Ölçüm Sistemleri

GİRİŞ

Günümüz sac metal şekillendirme teknolojisi hala büyük oranda deneme-yanılma prosedürüne dayanmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, operasyonlar sırasında ortaya çıkabilecek hataları mümkün olduğu kadar elimine edebilecek modeller bulmak üzerine odaklanmıştır. Sac metallerin şekillendirilebilirlik sınırlarına karar verilmesi, başarılı bir sac metal şekillendirme operasyonu için anahtar konulardan biridir. İlk şekillendirilebilirlik testleri sadece malzemeleri test etmek için tasarlanmıştır. Kilometre taşı sayılabilecek en önemli çalışma Keeler [1] ve Goodwin [2] tarafından gerçekleştirilen kritik gerinme kavramı üzerine olmuştur. Sınır gerinmelerini kullanarak elde edilen bu diyagram, şekillendirilebilirlik diyagramı (ŞD) olarak adlandırılmış veya daha basit şekliyle Keeler-Goodwin Diyagramı (Şekil 1) olarak bilinmektedir. Birçok araştırmacı son 30 yıl boyunca hem şekillendirilebilirlik diyagramını açıklamak hem de geliştirmek için çalışmıştır. Şekillendirilebilirlik diyagramlarına karar vermek için birçok teorik yöntem geliştirilse de, halen en yaygın olan metotlar deneysel metotlardır.

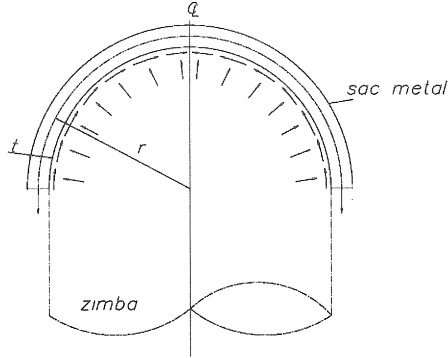


Şekil 1. Goodwin-Keeler şekillendirilebilirlik diyagramı

Şekillendirilebilirlik diyagramlarını sayısal yöntemler yardımıyla elde etmek için birçok araştırmacı çalışmıştır [3-5]. Farklı akma kriterlerinin kullanılmasını da kapsayan birtakım analitik ve sayısal yöntemler de ayrıca yayımlanmıştır. Hill'in akma kriteri [4-6], Karafillis-Boyce'un kriteri [7,8], Gurson'un akma kriteri [9], Golonau-Lebland-Devau(GLD)'un akma [10] kriteri, von Mises [11,12] ve Swift metoduna dayanan analitik modeller tanıtılmıştır ve bunların deneysel sonuçlarla olan iyi bağıntıları gözlemlenmiştir.

Deneysel ŞD belirlenmesinde ise, Nakajima ve Marciniak metotları tüm diğer metotlar arasında harici bir uygunluk göstermektedir. Nakajima

metodunda, yarı küresel zımba kullanılır ve sac metal zımba üzerine giydirilir (Şekil 2). Ölçüm stratejisi genel olarak, gerdirilmiş test numunesine dairesel grid metodu uygulanması ile gerçekleştirilir. Şekillendirilebilme diyagramlarına ihtiyacın artması ile birlikte, ölçüm teknolojileri geliştirilmiş, daha hızlı ve hassas olan optik ölçüm sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Şekillendirilebilme diyagramlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmakta olan dijital görüntü işleme teknolojisi üzerinde yoğun olarak birçok araştırmacı çalışmıştır [14-16].



Şekil 2. Yarı küresel zımba ve sac metal

Bu çalışmada, alüminyum alaşımı AA2024'ün oda sıcaklığında farklı test durumlarındaki Şekillendirilebilme diyagramlarının belirlenmesinde yarı küresel bir zımba ile birlikte şekillendirilebilme test düzeneği kullanılmıştır. Alüminyum sacların Şekillendirilebilme diyagramlarını elde etmek ve deformasyonlarını ölçmek amacıyla yüksek hassasiyetli hızlı CCD kameraları kullanılmıştır. Bu çalışma çekme ve hidrolik şişirme test sonuçlarını içermektedir. Sonlu elemanlar çalışması kısmında ise, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış ve yaklaşık bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Son olarak, tüm bulgular sonuç kısmında özetlenmiştir.

MEKANİK MALZEME KARAKTERİZASYONU

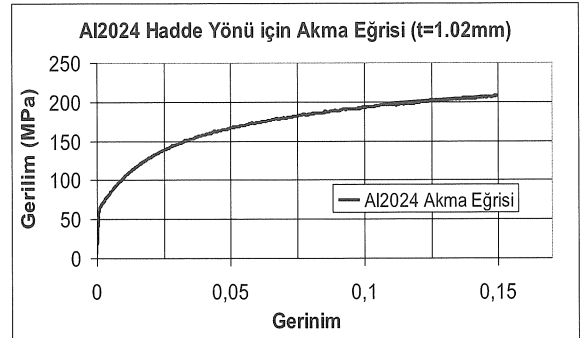
Malzeme karakterizasyonu tüm mühendislik uygulamalarının en önemli aşamasıdır. Ürün kalitesi artırılırken, imalatın maliyetini azaltmak önemli bir zorunluluktur. Malzeme karakterizasyonu, metal şekillendirme işlemlerinin başlangıcında yer alan önemli bir adımdır, fakat operasyonun tüm aşamalarını da etkilemektedir.

Tasarım ve imalatta bilgisayar kullanımı arttıkça, malzeme karakterizasyonu daha büyük önem kazanmaktadır. Başarılı bir tasarım elde etmek için, mühendislerin malzeme davranışını bilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, mekanik malzeme karakterizasyonu için hem çekme testi hem de HŞT kullanılmıştır.

Çekme testi en yaygın kullanılan ve en kolay uygulanabilen mekanik malzeme karakterizasyonu yöntemidir. Oldukça yaygın ve faydalı olmasına

rağmen, çekme testinde karşılaşılan sınırlamalar yüzünden farklı metotlar geliştirilmiştir. Çekme testleri dâhili uzama ölçerlere sahip olan cihazlara göre daha hassas akma eğrileri elde etmek için, harici uzama ölçerli Zwick/Z300 çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 250 mm/dk'lık zımba hızı ile oda sıcaklığında yürütülmüştür.

Malzemenin anizotropi özelliklerini tespit etmek için, 3 farklı hadde yönüne göre yapılan testler, her bir parametre için 3 kere tekrarlanarak toplamda 9 test yapılmıştır. Sapmanın %5 olduğu testler iptal edilmiştir ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak anizotropi özellikleri elde edilmiştir. Çekme testi sonuçları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. AA2024 Akma eğrisi (1,02mm kalınlık için)

Sac malzemeden üretilen çekme testi numuneleri ASTM Standartlarına[17] göre imal edilmiştir ve testler 10^{-3} s⁻¹ gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. Gerçek gerilim-gerinim eğrileri Voce denklemi kullanılarak formüle edilmiştir. Bu çalışmada ki çekme testleri SE malzeme girdilerinin elde edilmesi için gerekli olan üç farklı yöndeki akma noktalarını elde etmek için kullanılmıştır.

Hidrolik Şişirme testi (HŞT) ise, basit tek eksenli çekme testinin ortaya çıkardığı dezavantajları elimine ederek sac metal malzemenin özelliklerini elde etmek için kullanılmıştır. Kısacası, tek eksenli çekme testi sadece tek eksenli gerinim durumu için veri sağlamaktadır ancak sac metal operasyonları hem tek eksenli hem de iki eksenli gerinim durumları ile açıklanmaktadır. HŞT ile ekstrapolasyon minimize edilir böylelikle işlem sertleşmesi değişkeninin elde edilmesi oldukça kolaylaşır [18].

Bu gerçeklerin ışığında, iki eksenli çekme testleri daha güvenilir ve hassas malzeme davranışını belirlemek amacıyla mühendisler tarafından geliştirilmek istenmektedir. İki eksenli çekme testleri, standart çekme testinde elde edilen gerinim değerinin en az iki katının elde edilmesi için yapılmaktadır. Bu yüzden, HŞT iki eksenli gerilim durumunda; şekillendirilebilirlik, tedarik edilen sac kalitesi, malzeme sünekliği ve ayrıca akma gerilimi eğrisini elde etmek amacıyla yapılmıştır [19]. Diğer testlerin aksine, HŞT numunesinin hazırlanması daha kolay

olmakla beraber zaman ve maliyet tasarrufu da sağlamaktadır. HŞT işleminde numune rijit olarak sabitlenir ve yırtılma oluşuncaya kadar sıvı basıncı ile gerdirilir. Tek eksenli çekme testlerinde yaklaşık 0,2 gerinim değerleri elde edilirken, HŞT'de 0,7'ye varan yüksek deformasyon koşulları elde edilir [20].

Yukarıda da bahsedildiği üzere, HŞT yüksek gerilim-gerinim değerleri elde etmek için kullanılır böylelikle SE uygulamaları için gerekli olan ekstrapolasyonlar elimine ve/ya minimize edilir.

HŞ testleri boyunca, yüksek hızlı CCD kameraları kullanılmıştır ve gerinim ölçümleri anlık olarak incelenmiştir. Aynı zamanda, zımba kuvveti kayıt altına alınmıştır ve gerilim değerini hesaplamak için basınç elde edilmiştir.

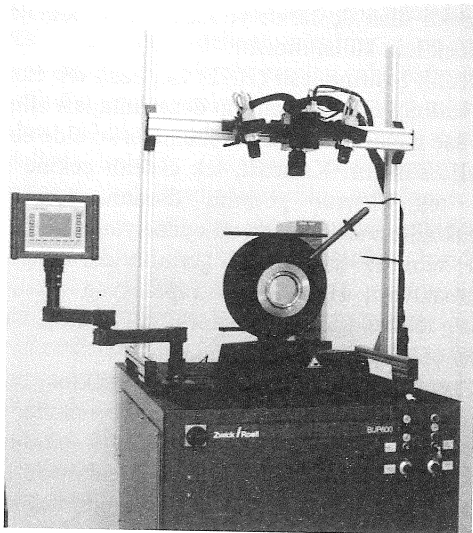
Ayrıca CCD kameralar kullanılarak sac metalin zirve noktasının kalınlığı hesaplanmıştır. Deneysel veriler kullanılarak, yeni geliştirilmiş kod ile gerilim-gerinim diyagramı hesaplanmıştır.

DENEYSEL PROSEDÜR

Sac metal şekillendirilebilirliği açıklamak için kullanılan en iyi yöntem Şekillendirilebilirlik sınır diyagramlarıdır (ŞSD). Bu çalışmada, ŞSD uygulamaları üç ana kategoride altında incelenmiştir. Bunlar;

- Sürtünme Testleri,
- Gerinim hızları,
- Ve kalınlık testleridir.

ŞSD çalışmaları boyunca, ARAMIS optik ölçüm sistemi ile 60 tonluk Zwick/Roell hidrolik presinin kombinasyonu kullanılmıştır.

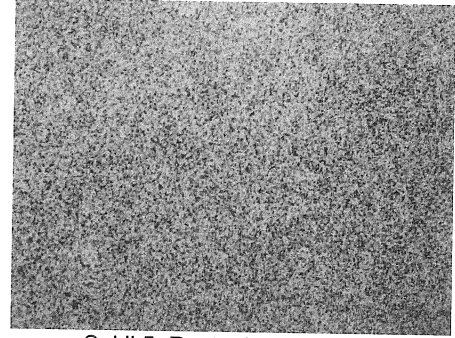


Şekil 4. BUP600 ve GOM-Aramis Sistemi

Tüm deneyler için alüminyum alaşımı AA2024 kullanılmıştır. Mikro çatlak, geometrik ve boyutsal

hataları önlemek amacıyla sac numune istenilen toleranslara su jeti kesme tekniği ile hazırlanmıştır.

Diğer taraftan, dairesel grid metodu gibi konvansiyonel yöntemlerin negatif etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla optik ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Optik ölçüm sistemleri sadece hassas değil aynı zamanda hızlı ve güvenilir bir metottur. Sistem her bir deformasyon adımını kayıt altına alır ve önceden kayıt altına alınan bu fotoğrafları rastgele şablon (Şekil 5) yöntemi ile deformasyon ölçümünde kullanır.



Şekil 5. Rastgele şablon

Sürtünme Testleri

Sürtünmenin şekillendirilebilirlik sınırları üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla farklı sürtünme durumları için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu farklı yağlama ortamları PTFE(politetrafloroetilen) ve parafin kullanılarak oluşturulmuştur. Son ortam ise, yarı küresel ve sac parça arasında herhangi bir yağlama kullanılmadan gerçekleştirilen kuru ortamdır.

Kalınlık Testi

İş parçasının işlem öncesi kalınlığının ŞSD üzerindeki etkisini incelemek için kalınlık testleri gerçekleştirilmiştir. Sac metallerin soğuk haddelenmesi ile birlikte anizotropik özellikleri de değişir ve buna bağlı olarak şekillendirilebilirlik sınırları da değişmektedir. Bu bölümde, sac metal kalınlığının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar boyunca, AA2024 alüminyum alaşımı 0,81mm, 1,27mm ve 1,60mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta kullanılmıştır. Testler aynı koşullar altında ifa edilmiştir. Tüm numuneler için Teflon yağlayıcı kullanılmıştır. Test hızı 2,5 mm/dk(150mm/dk) olarak belirlenmiştir.

Gerinim Hızı Testi

Gerinim hızı testleri, şekillendirme hızının şekillendirilebilirlik sınırlarına olan etkisini elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Test cihazının kapasitesine bağlı olarak, şekillendirilebilirlik sınır deneyleri 2,5

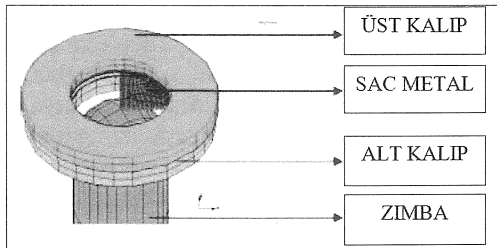
mm/sn'lik zımba hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mühendisler gerçek şekillendirme koşullarına en yakın olan deneysel koşulları elde etmek zorundadırlar. Bu nedenle, şekillendirilebilme sınırları üç farklı zımba hızında yapılmıştır. BUP600 cihazının maksimum zımba hızı 750 mm/dk'dır ve ŞSD elde etmek için kullanılan standart hız 150mm/dk'dır. Testler 150mm/dk, 450mm/dk ve 750 mm/dk'lık zımba hızları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gerçek mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir araçtır. SE sayısal türev alma çözüm tekniğidir. Metot, karmaşık problemleri daha küçük ve kolay elemanlara böldüğü için yaklaşık sonuçlar vermektedir ancak eleman sayısının artırılmasıyla çözüm kalitesi de artırılabilir.

Bu çalışmadaki, sonlu elemanlar uygulamaları farklı tipteki numunelerin kopma kuvvetlerinin elde edilmesi için ticari bir sonlu elemanlar programı olan Marc-Mentat® yardımıyla yürütülmüştür.

Çeyrek simetri ile 3B mekanik tip modeli kullanılmıştır. 0,25 eleman boyutundaki kabuk elemanlar seçilmiştir. Tek eksenli çekme testinden alınan anizotropi özellikleri ve HŞT sonuçları sac malzemeyi modellemek için kullanılmıştır. Anizotropi için Barlat'ın akma fonksiyonu kullanılmıştır ve parametreler doğrudan deneylerin kullanılması ile hesaplatılmıştır. Bütün takımlar rijit olarak modellenmiş ancak takım-kalıp deformasyonları sıfır veya ihmal edilebilecek kadar küçük seçilmiştir. ¼ model yaratılmış ve sınır durumları simetri düzlemleri etrafında sabitlenmiş hareket ve rotasyon ile uygulanmıştır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar metodu modellemesi

Farklı numunelerden elde edilen kopma kuvvetleri deneysel çalışmalardan alınan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sürtünme katsayıları sayısal olarak belirlenmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Şekillendirilebilme sınır diyagramları (FLD), sac metal şekillendirilebilirliğini ifade etmek için en iyi

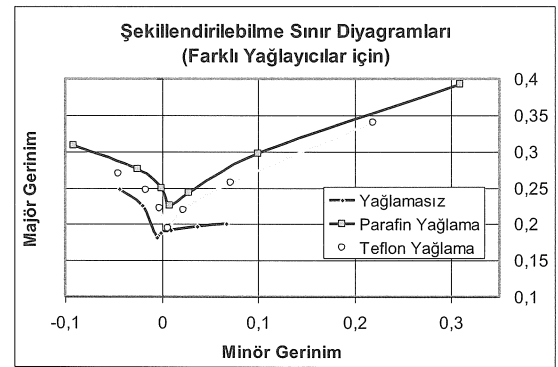
yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, şekillendirilebilirlik üzerinde etkisi olan birtakım parametreler incelenmiştir. Deneysel olarak, sürtünme durumunun, gerinim hızlarının ve iş parçası kalınlıklarının etkileri üzerine çalışılmıştır. Çalışmalar süresince gerçekleştirilen deneyler, havacılık sanayinde yoğun olarak kullanılan alüminyum AA2024 alaşımı kullanılarak tamamlanmıştır.

Sürtünme çalışmaları, üç farklı ortam araştırması ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için, PTFE (politetrafloroetilen) ve parafin gibi farklı özelliklerdeki yağlayıcılar ile birlikte herhangi bir yağlama tipi içermeyen kuru ortam kullanılarak, bu ortamların karşılaştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Beklenildiği üzere, alüminyum sac malzemenin şekillendirilebilirlik penceresi diğer durumlardan daha düşük çıkmıştır (Şekil 5). Malzemenin sınır gerinmelerini gösteren Şekillendirilebilme sınır eğrileri (FLC) yağlayıcı kullanıldığı durumlarda artmaktadır.

PTFE,katı ve sürekli yağlayıcılar, sac metal ve zımba arasında düşük sürtünme sağlayarak, kuru ortama göre FL eğrisini arttırmaktadır.

Son olarak, diğer iki ortama mukayesen en yüksek şekillendirilebilme sınırı parafin yağlayıcı kullanılarak elde edilmiştir. Parafin kullanıldığı durumlarda, ince fakat sürekliliği olan yağlama tabakası oluşturulabilmektedir ve böylelikle şekillendirilebilme sınırları artmaktadır.

Şekillendirilebilirlik pencereleri kıyaslanacak olursa; parafin yağlayıcının kullanılması ile birlikte, çift yönlü gerilim durumunda ortaya çıkan sınır gerinmeleri, kuru ortamda gerçekleştirilen proste ortaya çıkan sınır gerinmelerinin yaklaşık 2 katıdır ve tek eksenli gerinme durumunda bu oran yaklaşık olarak 1,4 katına eşit olmaktadır.

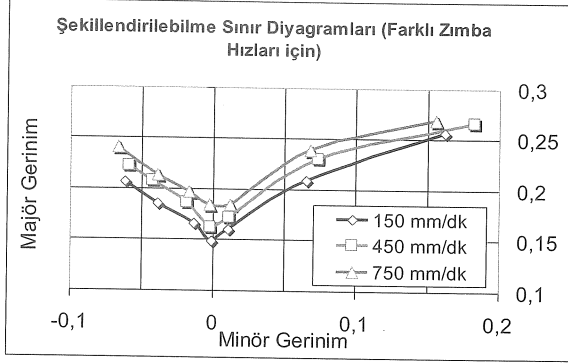


Şekil 7. Farklı yağlayıcıların şekillendirilebilmeye etkisi

Diğer taraftan, PTFE yağlayıcının kullanılması ile birlikte, çift yönlü gerilim durumunda ortaya çıkan sınır gerinmeleri, kuru ortamda gerçekleştirilen proste ortaya çıkan sınır gerinmelerinin yaklaşık 1,75 katıdır (Şekil 7) ve tek eksenli gerinme

durumunda bu oran yaklaşık olarak 1,2 katına eşit olmaktadır.

Gerinim hızı testleri 2,5 mm/sn, 7,5mm/sn ve 12,5 mm/sn olmak üzere üç farklı gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. Bütün gerinim hızı deneyleri PTFE yağlayıcı kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 8. Farklı zımba hızlarının şekillendirilebilirliğe etkisi

Şekil zımba hızının şekillendirilebilirlik sınırları üzerindeki etkisini göstermektedir. Zımba hızı 5 kat arttırıldığı zaman FLC sınırları maksimum %10 artmaktadır. Şekillendirilme hızı arttıkça, şekillendirilebilirlik sınırları da artmaktadır.

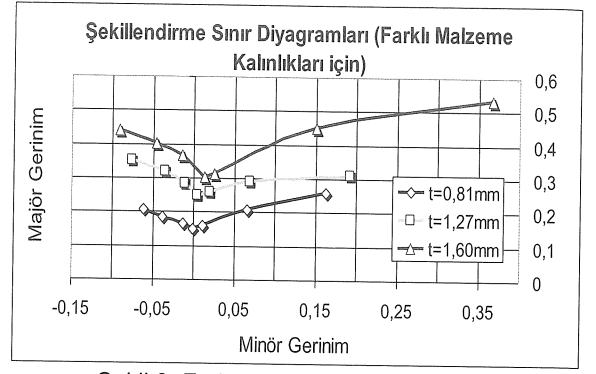
Son testler farklı malzeme kalınlıklarının şekillendirilebilirlik üzerinde etkisini araştırmak üzere gerçekleştirilmiştir. 0,81 mm, 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlıklarında farklı sac kalınlıkları test edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil malzeme sac kalınlığının FLD üzerindeki etkisini göstermektedir. Sac kalınlığı iki katına çıkartıldığında, sınır gerinimleri de iki katına çıkmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, sac metal ilk kalınlığı, gerinme hızı ve yağlama gibi parametrelerin AA2024 alüminyum alaşımının şekillendirilebilirlik sınırları üzerindeki etkisini incelemek için deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Testler BUP600 hidrolik presi ve GOM-ARAMIS optik ölçüm cihazı kullanılarak yürütülmüştür.

Bu çalışmada aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

Yağlamanın AA2024 alüminyum alaşımının şekillendirilebilirlik sınırlarının üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Tüm yağlama ortamları karşılaştırıldığında, Parafin yağlama ile en yüksek şekillendirilme sınır eğrileri elde edilmiştir. Diğer bir taraftan, PTFE(Teflon®), parafin yağlayıcıya mukayesen en yüksek sürtünme katsayısını vermiştir.



Şekil 9. Farklı malzeme kalınlıklarının şekillendirilebilirliğe etkisi

Tablo 1. SE ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Yağlayıcı	Metot	Minör Gerinim	Majör Gerinim	Kuvvet (Sürtünme Katsayısı)
Kuru	Deneysel	0.066	0.062	20634.9 N
	Sayısal	0.068	0.062	20223 N (0.2) 21920 N (0.3)
Parafin Yağlama	Deneysel	0.302	0.389	26.681 N
	Sayısal	0.31	0.342	26708 N (0.04) 26611 N (0.03)
Teflon Yağlama	Deneysel	0.256	0.275	24876 N
	Sayısal	0.233	0.254	24446 N (0.14) 25681 N (0.15)

Gerinim oranı veya zımba hızı da şekillendirilebilirlik sınırları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zımba hızı 5 katına çıkartıldığında, şekillendirilebilirlik sınırları da yaklaşık olarak %10 artmaktadır.

Son olarak, ilk malzeme kalınlığının etkisi araştırılmıştır ve malzeme kalınlığının da şekillendirilebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sınır gerinimleri, malzeme kalınlığının iki katına çıkartıldığı durumlarda aynı oranda artış göstermektedir. Sınır şekillendirilebilirlik eğrisi ilk malzeme kalınlığı ile arasında doğru orantılı bir bağıntı bulunmaktadır.

INVESTIGATION OF INFLUENCE PARAMETERS ON FORMING LIMIT DIAGRAMS OF ALUMINUM ALLOY-AA2024

Sheet metal forming that is used in automobile and aerospace industries is an important technology. To fulfill the customer expectations, safety requirements and market competitions, sheet metal forming processes must be well analyzed before

production. In this study, combination of FE (finite element) studies and mechanical material characterization to improve sheet metal forming processes. Uniaxial tensile and biaxial hydraulic bulge tests were performed on mechanical material characterization side of the studies. Deformation measurements were conducted using GOM-Aramis optical measurement system. AA2024 material was used for experimental and numerical studies. Initial material thickness, lubrication and strain rates are the parameters which are investigated in this study. FE studies were performed to predict coefficients of friction of different lubricants. Finally, good correlations were obtained between experimental and numerical studies.

Keywords: Sheet Metal Forming, Forming Limit Diagrams, Finite Element Analysis, Optical Measurement Systems.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, TAI(Turkish Aerospace Industry) ve Som Cıvata Somun San. ve Tic. A.Ş.'ye bu çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür etmektedirler.

KAYNAKÇA

1. S.P. Keeler: SAE Paper No. 650535, 1965 S.P. Keeler: SAE Paper No. 650535, 1965
2. G.M. Goodwin: SAE Paper No. 680093, 1968
3. T. Pepelnjak , K. Kuzman, Numerical Determination of the Forming Limit Diagrams, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20(2007), 375-378.
4. Iordache M., Axinte C., Theoretical And Experimental Studies Regarding the Semi Spherical Punch Process of Steel Sheets A5 Stas 10318-80, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
5. Campos H. B., Butuc M. C., Gracio J. J., Rocha J. E., Duarte J. M. F., Theoretical and Experimental Determination of the Forming Limit Diagram for the AISI304 Stainless Steel, Journal of Materials Processing Technology, 179(2006), 56-60.
6. Hiwatashi S., Bael A. V., Houtte P. V., Teodosiu C., Prediction of Forming Limit Strains Under Strain-Path Changes: Application of an Anisotropic Model Based on Texture and Dislocation Structure, International Journal of Plasticity 14(1998), 647-669.
7. Cao J., Yao H., Karafillis A., Boyce M. C., Prediction of Localized Thinning in Sheet Metal Using a General Anisotropic Yield Criterion, International Journal of Plasticity, 16(2009), 1105-1129.
8. Yao H., Cao J., Prediction of Forming Limit Curves Using an Anisotropic Yield Function with Prestrain Induced Back Stress, International Journal of Plasticity, 18(2002), 1013-1038.
9. Chien W. Y., Pan J., Tang S. C., a Combined Necking and Shear Localization Analysis for Aluminum Sheets Under Biaxial Stretching Conditions, International Journal of Plasticity, 20(2004), 1953-1981.
10. Son H. S., Kim Y. S., Prediction of Forming Limits for Anisotropic Sheets Containing Prolate Ellipsoidal Voids, International Journal of Mechanical Sciences, 45(2003), 1625-1643.
11. Avilla A. F., Vieira E. L. S., Proposing a Better Forming Limit Diagram Prediction: A Comparative Study, Journal of Materials Processing Technology, 141(2003), 101-108.
12. Butuc M. C., Gracio J. J., Rocha A. Barata da, A Theoretical Study on Forming Limit Diagrams Prediction, Journal of Materials Processing Technology, 142(2003), 714-724.
13. Holger A., Numerical Analysis of Diffuse and Localized Necking in Orthotropic Sheet Metals, International Journal of Plasticity, 23(2007), 798-840.
14. Hsu Q. -C., Comparison of Different Analysis Models to Measure Plastic Strains on Sheet Metal Forming Parts by Digital Image Processing, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43(2003), 515-521.
15. Konstantin G., 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS 2007.
16. Geiger M., Merklein M., Determination of Forming Limit Diagrams-A New Analysis Method for Characterization of Materials' Formability, Institute for Mechanical Engineering University of Erlangen-Nuremberg.
17. ASTM International Standards, Standards for Tensile Testing, ASTM E8-04, 2004.
18. Gologranc F., Evaluation of the Flow Stress Curve with the Continuous Hydraulic Bulge Test (Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven in Kontinuier-Lichen Hydraulischen Tiefungsversuch), Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1975.
19. Atkinson M., Accurate Determination of Biaxial Stress-Strain Relationship from Hydraulic Bulge Test of Sheet Metals, International Journal of Material Science, 39(1997), 761-769.
20. [20] Panknin W., The Hydraulic Bulge Test and Determination of the Flow Stress Curves (Der hydraulische Tiefungsversuch und die Ermittlung von Fließkurven), Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1959.

Ç1040 Çeliğinin Lazerle Kesilmesi Esnasında Kesme Parametrelerinin Nominal ölçüdeki Sapma Miktarına Etkilerinin İncelenmesi

Zülfünaz Durukan

MSc.

Ostim Mesleki Eğitim Merkezi
Ostim / ANKARA

Abdulmecit Gültaş

Yrd. Doç. Dr.

Abdulkadir Güllü

Yrd. Doç. Dr.

Makine Bölümü
Teknik Eğitim Fakültesi
Gazi Üniversitesi
ANKARA

Endüstride metallerin kesilmesinde lazer yöntemi ile kesme yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer ile kesmede uygun parametreler seçildiğinde takıma ihtiyaç duymaksızın ve malzeme ile temas olmadan, hızlı ve çapaksız kesim yapılır. Lazer ile kesmede kesilen parçanın boyutunu belirleyen birçok parametre bulunmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma da CO₂ lazer ile 4, 6 ve 8 mm kalınlığındaki Ç1040 malzemesi kesilmiştir. Kesme parametreleri olarak lazer gücü (W), kesme ilerlemesi (F), odak noktası (ON) ve gaz basıncı (P) kullanılmıştır. Kesme işleminde 100x100 mm boyutundaki kare ve 40 mm çapında delik delinmiş olup; dış kenar ve çap değerlerindeki sapmalar ölçülmüştür. Gerçekleştirilen bu çalışmaya göre lazer parametrelerine bağlı olarak boyut kararlılığında değişimler gözlenmiş olup, 4 mm' lik sac için dış kesimde en düşük ölçü değeri 99,535 mm, en büyük ölçü değeri ise 99,735 mm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca boyut üzerinde etki eden en önemli lazer parametresinin lazer gücü ve kesme ilerlemesi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Lazerle kesme, Lazer gücü, Odak Noktası, Boyut değişimi

GİRİŞ

Lazerler icat edildiği günden bu güne sürekli gelişen bir uygulama alanıyla karşı karşıyadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olumlu yönde gelişen lazerler endüstride çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Lazer dalgalarının tümü aynı frekansa sahip (tek renkli) ve birbirleriyle aynı fazda (uyumlu) olan ışık demeti oluşturur [1]. Lazer ışığı; ışık şiddeti artırılmış eş fazlı ışınımlardan oluşan ışık demetidir. Lazer ışık demeti iyi toplanabildiği için uzun mesafelere aktarılabilir. Lazer ışığı diğer ışık kaynaklarından daha şiddetlidir [2,3].

Hızla gelişen lazer teknolojileri sayesinde günümüze kadar birçok lazer türü geliştirilmiş olup, bu lazerler kullanıldıkları dalga boylarına, kullanılan aktif maddenin cinsine, enerjinin etkinliğine göre uygulama alanlarında birbirleri arasında farklılık gösterirler [4]. Yapı olarak lazerler; katı lazerler, sıvı lazerler ve gaz lazerler olarak ayrılırlar. Gaz lazerler, lazerlerin en geniş kullanma alanı olan tipleridir. Atomların elektronik enerji düzeyleri veya iyonların enerji düzeyleri ya da moleküllerin titreşim- dönme enerji düzeyleri arasındaki geçişlere uygun olarak gaz lazerler üç farklı gruba ayrılır. Bunlar atomik lazerler,

iyon lazerleri ve moleküler lazerlerdir. CO₂ lazeri en önemli

moleküler lazerdir [5]. CO₂ lazeri karbondioksit, azot ve helyum karışımından oluşan bir lazerdir. CO₂ Lazer geliştirilen ilk lazerlerden olup, hala en yaygın olarak kullanılan lazer tipidir. CO₂ lazer devamlı dalga olarak en yüksek güce ve verime sahiptir [1].

Oksijenle kesme veya plazma kesme yöntemleriyle yeterli derecede kesilemeyen ince saclarda lazer ışını ile kesmenin geliştirilmesiyle, yüksek kalitede ve hassas kesme işlemlerinin gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle, lazer ile kesme, hassas kesme işlemi olarak da değerlendirilmektedir [6]. Ölçü hassasiyeti gerektiren kesimlerde genellikle deneme yanılma yöntemi ile kesme parametreleri seçilmekte ve ölçü tamlığı sağlanmaktadır. Bu bağlamda deneysel olarak elde edilen parametrelerin kullanılması deneme yanılma yöntemini ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla üretimde para ve zaman kaybı önlenmiş olacaktır. Genel olarak lazer ışınıyla kesilmiş parçalar, sonradan bir ek işleme gerek olmadan, kesimden hemen sonra kullanılabilir [1].

Karbondioksit lazer tezgâhlarında lazer ışını, karbondioksit gazına elektrik akımı ile enerji verilerek elde edilir. Lazer ışını tezgâhın rezonatör bölümünde cam tüpler içinde 10 metreye yakın bir

mesafe kat eder. Lazer ışınının yönü aynalar sayesinde değiştirilebilmektedir. Yoğunlaştırılan ve yönlendirilen lazer ışınları kesme kafasına gelmekte burada kesme işlemi yapılmaktadır [7].

Malzemelere bir işlem yapmak için gerekli olan enerjinin malzemeye verilmesinde farklı uygulama yöntemleri vardır. Lazerde enerji ışık enerjisi olarak verilse de malzeme üzerine etkiyen ışık demetinin taşıdığı ısı enerjisi malzemede istenilen etkiyi yapar. Metaller yüksek ısı enerjisine tabi olduklarında zamanla kırmızısı bir renk (kor) alırlar. Metaller soğudukça malzeme üzerinden ısıl değişimlerden dolayı bir iz kalır. Bu iz literatürde ısıdan etkilenen bölge (ITAB-HAZ) olarak adlandırılır. ITAB oluşumu kesme işlemlerinde malzemenin işlem yapılan kısmının ısı etkisiyle uğradığı değişimin sonucudur. Bu değişim ölçü ve boyut açısından da istenmeyen bir durumdur ancak oluşumu kaçınılmazdır. [3].

Lazer ile kesmenin prensibi; yoğun ışığın malzemeyi ısıtması olduğu için burada işlenebilirlik açısından malzeme sertliği önemli değildir. Malzemenin ışığı yansıtma derecesi işlenebilirliği etkileyeni en önemli faktörlerden biridir. Çelikte karbon miktarı ne kadar fazla ise yani çelik ne kadar sertse kesilmesi kısmen de olsa kolaylaşmaktadır [8].

Bu çalışma sonucunda; Ç1040 çelik malzemelerin lazerle kesilmesi sırasında oluşabilecek

boyut sapmalarını en aza indirgeyecek parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

MALZEME VE METOD

2.1. Malzeme

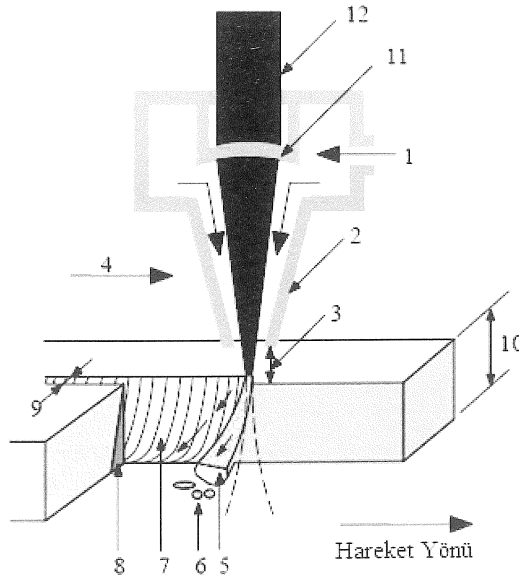
Yapılan deneysel çalışmalarda, endüstride yaygın olarak kullanılan Ç1040 malzemeden hazırlanan 4, 6 ve 8 mm kalınlığındaki numuneler kullanılmıştır. Malzemenin spektral analiz sonuçları ile elde edilen kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir [9].

2.2. Lazer Tezgâhı ve Parametreler

Lazer ile kesmede kesilen ürünün boyutları işleme parametrelerine bağlı olarak bir miktar sapma göstermektedir. Büyük oranda kesme parametrelerine bağlı olarak değişen bu sapmaları tespit edebilmek için 4 farklı lazer parametresi belirlenmiştir. Bunlar; lazer gücü, kesme ilerlemesi, odak noktası ve gaz basıncı seçilmiştir. Deney numunelerinin kesiminde 4,4 kW gücündeki BYSPEED 3015 marka CO₂ lazer kesme tezgâhı kullanılmıştır [11]. Lazer tezgâhında kesme işleminin nasıl gerçekleştiğinin daha iyi anlaşılması için kesme ilerlemesi yönü Şekil 1'de gösterilmiştir [10].

Çizelge 1. Ç1040 çelik malzemenin kimyasal analizi

Alaş. Elemnt.	Kimyasal Bileşim (% ağırlık)													
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	W	Fe
Ç1040	0.217	0.001	0.426	0.026	0.022	0.0001	0.064	0.001	0.001	0.001	0.017	0.001	0.003	99.21



1. İşlem gazı
2. Nozul
3. Nozul-Yüzey arası boşluk
4. Kesme ilerlemesi
5. Dışarıya akan erimiş malzeme
6. Dışarıya atılmış malzeme
7. Kesme çizgileri
8. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB)
9. Kesme aralığı
10. Malzeme kalınlığı
11. Odaklama lensi
12. Lazer ışını

Şekil 1. Lazerle kesme işlemi [1]

Çizelge 2. 4, 6 ve 8 mm kalınlığındaki Ç1040 malzemesinin kesimi için kullanılan bağımsız parametreler

Parametre	Sembol	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Güç	W	Watt	3000	3800	4600
Kesme ilerlemesi	F	mm dk	2300	2700	3100
Odak Noktası	ON	mm	3.0	3.5	4.0
Basmaç	P	Bar	0.5	0.55	0.60

Çizelge 2’de görüldüğü gibi, lazer gücü, kesme ilerlemesi, odak noktası ve gaz basıncı parametrelerinin her biri için üç farklı değer kullanılmıştır. Ayrıca 4, 6 ve 8 mm olmak üzere 3 farklı kalınlıktaki malzeme kullanılmış olup her bir kalınlık için 81 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Böylece toplam 243 adet farklı numune kesilmiştir.

2.3. Boyut Ölçümleri

Kesilen deney numunelerinin kesilen kenarlarının istenilen boyutta kesilip kesilmediğini kontrol edebilmek amacıyla DEA marka CMM üç boyutlu ölçme cihazı kullanılmıştır. Bilgisayar kontrollü ve 15 ° ile her yöne dönebilen proba sahip CMM cihazı kullandığı hassas ve pratik ölçümler yapabilmesi sayesinde kesilen kenarların boyut ölçüleri güvenilir bir şekilde elde edilebilmiştir.

Numunelerin ölçümleri yapılırken; cihazın prob ucu dış kenarlardan köşelere yakın mesafede her kenara iki kez dokundurularak, kenar üzerindeki bu iki noktadan bilgisayar ortamında bir doğru çizilerek şeklin dış kenarları oluşturulmuştur. Kesilen numunenin ölçüleri Şekil 2’de verilmiştir.

Bu işlemler kesilen tüm numuneler için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de görülen dış kenar (100x100 mm) ve daire (Çap 40 mm) şekillerde ölçme sistemi; prob uç dış kenara dıştan köşelere

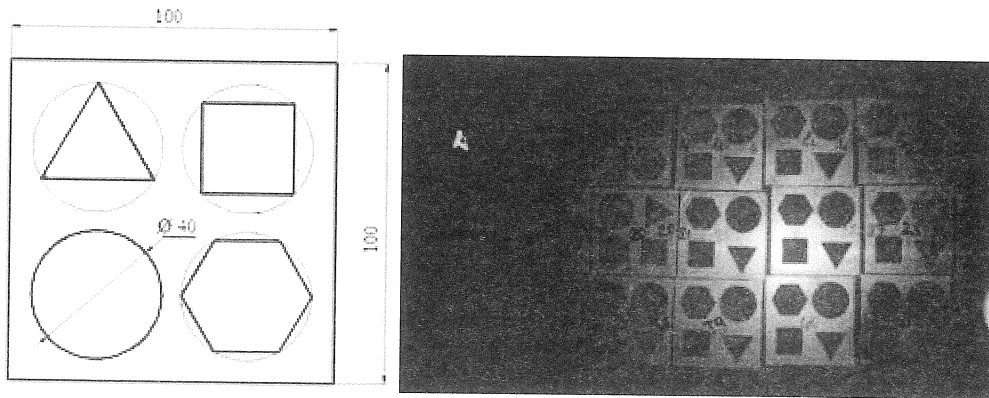
yakın yerlere dokundurularak kenarlar bilgisayar ortamında oluşturulmuştur ve bu kenarların uzunluğu ölçülmüştür. Daire ölçümünde prob uç içten 26 noktaya dokundurularak, bilgisayar ortamında bu noktalarından geçen bir daire çizdirilmiştir. Bu dairenin çapı ölçülen numunedeki dairenin çapını belirlemiştir. Bu şekiller için ölçümlerin ortalamaları alınmıştır. Kullanılan istatistik programı neticesinde Regresyon katsayısı (R^2) bire en yakın değerde tahminsel denklemler bulunmuştur [1].

3. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

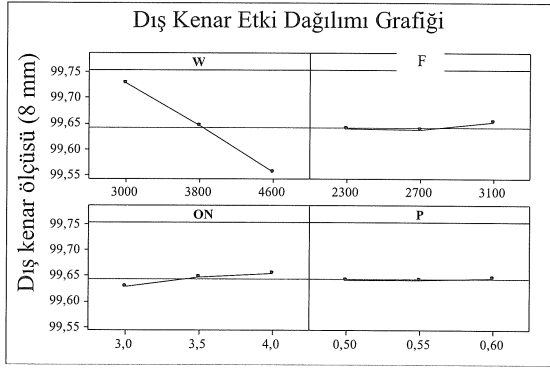
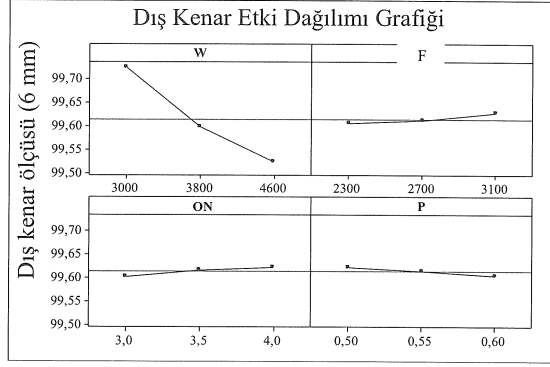
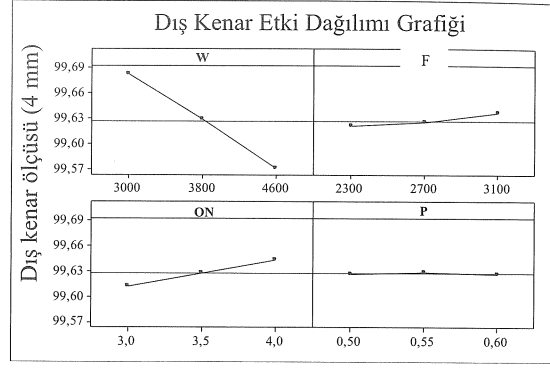
3.1. Boyut Değişimleri ve Tahminsel Denklemleri

Farklı kalınlıklardaki malzemelerin boyut ölçümleri numune üzerinden birçok ölçüm alınarak saptanmıştır. Bu bağlamda boyut ölçümleri ile alakalı birçok tahminsel denklem ve grafik oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında kare profil kesimi ve daire kesimi incelenmiştir. Bu grafiklerden dış kenar etki dağılımı grafikleri Şekil 3’de, daire çap ölçme sonuçları üzerindeki etki dağılımı grafikleri Şekil 4’de gösterilmektedir. Dış kenar ve daire çap etki dağılımı grafikleri lazer kesimde kullanılan parametrelerin numune dış kenar boyutu ve daire çap değişimi üzerine etkilerini göstermektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmaya göre, 4 mm kalınlığındaki malzemede dış kenar değişimine etki eden en etkili parametrenin “güç” parametresi olduğu görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi değişim çizgisi, gücün artmasıyla azalan ve lineer bir ilişki ortaya koymaktadır. Bu ilişki en geniş değişim aralığına karşılık gelmektedir. “Odak noktası” da güç gibi etkili çıkmıştır. Ancak buradaki odak noktası ve dış kenar ilişkisi lineer olmakla birlikte artan bir değişim ile sonuçlanmıştır.



Şekil 2. Lazer tezgâhında kesilen numune ve ölçüleri



Şekil 3. Ç1040 4, 6 ve 8 mm malzemeler için parametrelerin dış kenar ölçme sonuçları üzerindeki etki dağılımı grafikleri

Bu parametrenin değişim aralığı güçten daha az ve ikinci sırada etkili gözükmektedir. Bu etki grafikteki odak noktasını gösteren çizginin eğiminden anlaşılmaktadır.

Kesme ilerlemesi parametresinde de odak noktası gibi artan bir değişim gözlenmekle birlikte, değişim daha düşük bir eğimle gerçekleşmiştir. Kesme ilerlemesi parametresi üçüncü sırada etkili olmuştur. Gaz basıncı parametresinin en düşük 0,50 değeri ve en yüksek 0,60 değeri ortalama çizgisi üzerinde gerçekleşirken, aradaki değerlerde sapma olmadığı grafikte gösterilmiştir. Gaz basıncının, 0,50, 0,55 ve 0,60 değerleri hepsi birden dikkate alındığında, dış kenar ölçüsü için çok etkili bir

parametre olmadığı anlaşılmaktadır. Gaz basıncı, diğer parametrelerin dış kenar ölçme sonuçları üzerindeki etkisi ile kıyaslandığında etkisi diğer parametrelere göre az olduğu saptanmıştır. Lazer kesmede gaz basıncının öneminin lazer kesim sırasında cürufun dışarı atılmasında etkili olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu deneysel veriler kullanılarak geliştirilen tahminsel denklem; kesme parametrelerinin etki dağılımları, kareleri ve birbirleriyle olan etkilerinden oluşmaktadır. Tahminsel dış kenar ölçüm ortalamasının değerlerini veren; etki dağılımları, kareleri ve birbirleri arasındaki etkileri de içeren denklem;

$$\begin{aligned}
Dis\ Kenar = & 99,3 + (0,000044 W) + (0,000010 F) + (0,054 ON) + (1,10 P) - (0,0012 ON^2) \\
& - (0,89P^2) - (0,000005 W * ON) + (0,000019 W * P) + (0,000013 F * ON) - (0,000118 F * P) \\
& - (0,018 ON * P)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

şeklinde elde edilmiştir. Elde edilen denklemin standart sapması $S=0,01247$ ve regresyon katsayısı $R^2=0,949$ olarak elde edilmiştir. Bu denklem, istatistik programına göre parametrelerle ölçme sonuçları arasında % 95 anlamlılık seviyesinde geliştirilmiştir. Bu tahminsel denklem kesme parametrelerinin dış kenar ölçüm ortalaması değeri üzerindeki etkilerini % 94,9 seviyesinde olduğunu açıklamaktadır. Minitab programı, denklemde verilmeyen parametrelerin katsayılarını sıfır olarak hesaplamıştır ve parametrelerin etkilerinin olmadığı düşünülerek denklemden çıkarılmıştır. Örneğin, bu denklemde lazer gücünün karesi (W^2) ve kesme ilerlemesinin karesi (F^2) etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

$$\begin{aligned}
Dis\ Kenar = & 99,4 - (0,000336W) + (0,000348F) + (0,077ON) + (2,27P) + (0,0161ON^2) \\
& - (1,76P^2) + (0,000018W * ON) - (0,000087W * P) - (0,000034F * ON) - (0,000428F * P) \\
& + (0,252ON * P)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Denklem kesme parametrelerinin dış kenar ölçüm ortalaması değeri üzerindeki etkilerini % 81,3 seviyesinde açıklamaktadır. Şekil 3'de 6 mm kalınlığındaki numunelerin kesme parametrelerinin dış kenar ölçüleri üzerine etkileri gösterilmektedir. Burada genel olarak en etkili parametrenin güç olduğu görülmektedir. Lazer gücü arttıkça dış kenar ölçme sonuçları beklenen ölçme sonucundan (100 mm) düşmektedir. Lazer gücünün en yüksek değeri olan 4600 W gücünde dış kenar en düşük değeri olan 99,53 mm değeri ölçülmüştür. 6 mm lik malzemenin lazer ile kesiminde kesme ilerlemesinin dış kenar ölçme sonuçları üzerinde çok etkili bir parametre olmadığı ortaya çıkmaktadır. 2700 mm/dk ilerlemede ölçme sonuçlarının ortalama değeri olan 99,60 mm değeri ortaya çıkmaktadır. Lazer kesme sırasında kesme ilerlemesinin artırılması ölçme sonuçları üzerinde çok etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Kesme

Ç1040 6 mm olan deney numunelerinin lazer kesme ve CMM üç boyutlu ölçme cihazı ile ölçümünden sonra bulunan deneysel veriler kullanılarak geliştirilen tahminsel denklem; kesme parametrelerinin etki dağılımları, kareleri ve birbirleriyle olan etkilerinden oluşmaktadır. Tahminsel dış kenar ölçüm ortalamasının değerlerini veren etki dağılımları, kareleri ve birbirleri arasındaki etkileri de içeren denklem, Eş. 3.2'de verilmiştir.

Eşitliği standart sapması $S=0,0455749$ ve regresyon katsayısı $R^2=0,813$ olarak elde edilmiştir.

ilerlemesinin alt ve üst değerleri ortalama çizgisinden çok az sapmalar göstermiştir. Kesme ilerlemesinin artırmak dış kenar ölçme sonuçlarının artmasına neden olmuştur. Şekil 3'deki ikinci grafikte odak noktasını artırmak ölçme sonuçlarını en fazla 99,63 mm seviyesine çıkarabilmiştir. Bu da odak noktasının etkili bir parametre olmadığı sonucunu doğurmuştur. Aynı grafikten gaz basıncı parametresinin artırılması dış kenar ölçme sonuçlarında 99,60 mm değerine kadar düşürdüğü gözlenmektedir. Aynı şekilde gaz basıncı parametresi 6 mm lik malzemenin kesiminde etkili bir parametre olmadığı anlaşılmaktadır.

Ç1040 8 mm olan deney numunelerinin, tahminsel dış kenar ölçüm ortalamasının tahminsel değerlerini veren; etki dağılımları, kareleri ve birbirleri arasındaki etkileri de içeren denklem aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
Dis\ Kenar = & 101 - (0,000135W) - (0,00068IF) + (0,132ON) - (1,53P) - (0,0209ON^2) + (0,33P^2) \\
& + (0,000003W * ON) - (0,0002W * P) - (0,000012F * ON) + (0,000439F * P) + (0,209ON * P)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Denklemin standart sapması $S=0,04513$ olurken regresyon katsayısı $R^2=0,769$ olarak bulunmuştur. Regresyon katsayısı, lazer kesme parametrelerinin, dış kenar ölçme sonuçları üzerinde % 76,9 seviyesinde etkili olduğunu açıklamaktadır.

8 mm kalınlığındaki malzemenin dış kenar grafiğinde de en etkili parametrenin "güç"

parametresi olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3'deki son etki dağılımı grafiğinde; lazer kesme sırasında lazer gücü arttırıldıkça, dış kenar ölçme sonuçları 100 mm olan anma ölçüsünden çıkarılmaktadır. Kesme ilerlemesinin artırılması sonuçların çok az artmasına neden olmuştur. Kesme ilerlemesi dış kenar ölçme sonuçları üzerinde etkili bir parametre olarak

görülmemektedir. Odak noktası artıkça, dış kenar ölçme sonuçları çok az artmıştır. Bu grafikte odak noktası, kesme ilerlemesinden daha etkili bir parametre olarak ortaya çıkmıştır. Grafikte son olarak gaz basıncı parametresinin üç değeri de ortalama çizgisi üzerinde kaldığı gözlemlenmektedir. Bu da gaz basıncı parametresinin; 8 mm kalınlığındaki malzemenin lazer kesiminde, dış kenar ölçme sonuçları üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı

göstermektedir. Grafikte genel olarak bir etki sıralaması yapılırsa en etkili parametrenin güç olduğu, gaz basıncı parametresinin de etkili olmadığı görülmektedir.

4 mm kalınlığındaki malzemede kesilen numuneler üzerinden ölçülen dairenin çap ölçüleri istatistiksel olarak incelendiğinde; tahminsel daire çapını veren etki dağılımı sonuçlarını, karelerini ve birbirleri arasındaki etkilerini de içeren denklem;

$$\begin{aligned} \text{Çap} = & 39,3 + (0,000095W) - (0,00014IF) - (0,28ON) + (3,5P) + (0,00563ON^2) - (3,32P^2) + \\ & (0,000001W * ON) - (0,000006W * P) + (0,000009F * ON) + (0,000043F * P) + (0,26ON * P) \end{aligned} \quad (3.4)$$

şeklinde elde edilmiştir. Elde edilen denklemin standart sapması $S = 0,008651$ ve regresyon katsayısı $R^2=0,934$ olarak elde edilmiştir. Denklem kesme parametrelerinin dış kenar ölçüm ortalaması değeri üzerindeki etkilerini %93,4 seviyesinde açıklamaktadır. Şekil 4' de bağımsız parametrelerin daire çap ölçme sonuçlarına etkilerini ayrı ayrı göstermektedir.

Görünen en etkili parametre güçtür. Grafikten de anlaşılacağı gibi değişim çizgisi gücün artmasıyla artan bir ilişki ortaya koymaktadır. Burada lazer gücünün en yüksek değeri olan 4600 W uygulandığında, 40,20 mm çap değeri ölçülmüştür. Kesme ilerlemesinin artmasıyla daire çap ölçme sonucunda azalma meydana gelmiştir. Buradaki ilişki gücün aksine azalan bir değişim ile sonuçlanmıştır. Bu parametrenin değişim aralığı güçten eğimin farklı olması nedeniyle daha az etkili gözükmektedir. Kesme ilerlemesinde; kesme işlemi sırasında

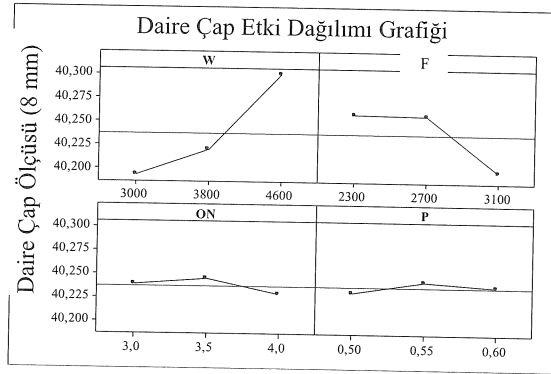
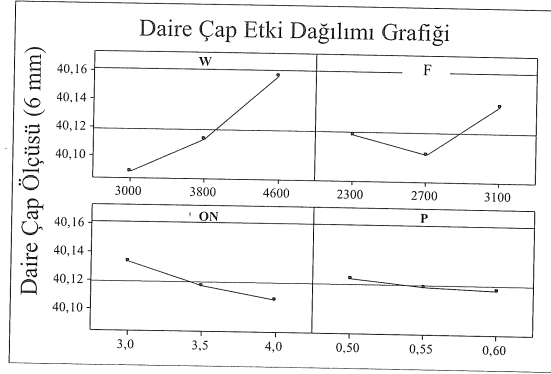
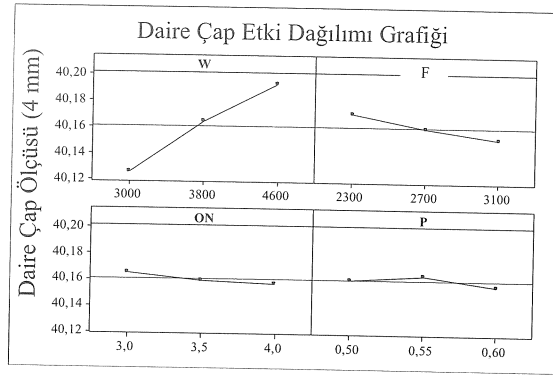
uygulanan en yüksek değerinde (3100 mm/dk) daire çap ölçme sonucu anma ölçüsü (40 mm) değerine en yakın olan 40,15 mm değeri ölçülmüştür. Daire çap ölçme sonuçlarına odak noktası parametresinin etkisi düşük olarak gerçekleştiği gözlenmiştir. Gaz basıncı parametresinde seçilen en büyük değer, daire çap ölçme sonucu üzerinde olumlu bir etki yapmış olsa da, üç farklı çap değeri birlikte dikkate alındığında, daire çap ölçüsü için çok etkili bir parametre olmadığı söylenebilir. Şekil 4'deki ilk grafiğinde; gaz basıncının 0,55 bar değerinde sonuçları yükselttiği görülmüş olsa da; gaz basıncı diğer parametrelere göre en etkisiz parametre sonucuna varılmıştır.

Ç1040 6 mm numunelerin kesme parametrelerinin daire çap sonuçları üzerine etkilerinin, istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle türetilen tahminsel denklem Eş. 3.5' deki gibi gerçekleşmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Çap} = & 38,4 - (0,00034W) + (0,000989F) + (0,182ON) + (3,39P) - (0,0436ON^2) - (4,02P^2) + \\ & (0,000008W * ON) + (0,000208W * P) + (0,000013F * ON) - (0,000106F * P) + (0,157ON * P) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Oluşturulan bu denklemde standart sapma $S=0,0151281$ ve regresyon katsayısı $R^2=0,941$ olarak bulunmuştur. Bu denklem kesme parametrelerinin daire çap ölçme sonuçları üzerindeki etkilerini, %94,1 seviyesinde açıklamaktadır. Şekil 4'deki ikinci grafik; lazer gücünün artmasıyla çap ölçme sonuçlarının arttığı gözlenmektedir. Burada en ideal ölçme sonucu 3000 W lazer gücü uygulanan numunelerde ortaya çıkmıştır. Grafik, gücün ortadaki seçilen değerine kadar düşük bir eğimle değişim gösterirken, en yüksek değerine kadar olan sonuçlarda, daha yüksek bir eğimle doğru çizmiştir. Gücün artması lazer kesmede, kesmenin kolay yapılmasını sağlarken, çap ölçme sonuçları üzerinde olumsuz sonuçlar ortaya koymaktadır. Grafikte

kesme ilerlemesi parametresinin etkisine bakıldığında; 2700 mm/dk olan değeri çap ölçme sonuçlarında, anma ölçüsü değerine en yakın olan 40,10 mm değerinin ölçülmesiyle sonuçlanmıştır. Odak noktasının kesme sırasında artırılması, malzemenin kesitinden bakıldığında daha derinlerinden odaklanmasını sağladığı için ölçme sonuçlarının da istenilen değere yakın çıkması beklenmektedir. Grafikte de bu sonuç karşımıza çıkmaktadır. 6 mm malzemelerde gaz basıncı parametresi için gaz basıncının artırılması kesim sırasında cürufun atılmasına yardımcı bir parametre ölçme sonuçları üzerinde ki etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın genelinde, gaz basıncı dış kenar ya da çap ölçme sonuçları üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.



Şekil 4. 4, 6 ve 8 mm kalınlığındaki malzemeler için parametrelerin daire çap ölçüm sonuçları üzerindeki etki dağılımı grafikleri

Ç1040 8 mm malzemede daire çapını veren; etki dağılımı sonuçlarını, karelerini ve birbirleri arasındaki etkilerini de içeren denklem Eş. 3.6' da verilmiştir. Bu denklemin standart sapması $S=0,01894$ ve regresyon katsayısı $R^2=0,801$ olarak elde edilmiştir. Denklem kesme parametrelerinin daire çap ölçme değerleri üzerindeki etkilerini %80,1 seviyesinde açıklamaktadır. Bu denklem, istatistik programına göre parametrelerle ölçme sonuçları arasında %95 anlamlılık seviyesinde geliştirilmiştir.

Şekil 4'de 8 mm için en etkili parametre en geniş ölçme aralığını kapsamaması nedeniyle güç parametresidir. Lazer kesme sırasında güç artırılmasıyla; ölçme sonuçları 40 mm olması gereken değer üstünde gerçekleşmiştir.

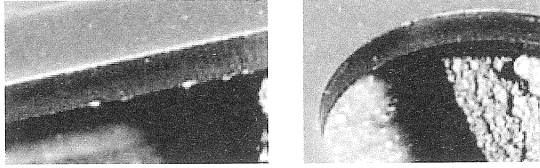
Kesme ilerlemesi parametresinin daire çap ölçme sonuçlarına etkisi, 2700 mm/dk değerinde bir değişme göstermemiştir. 3100 mm/dk en yüksek değerinde istenilen ölçme sonucuna en yakın ölçme sonucu ortaya çıkmaktadır. 8 mm kalınlık için en iyi kesme ilerlemesi değeri 3100 mm/dk olan değerdir. Odak noktasının kesme sırasında artırılması, malzemenin kesitinden bakıldığında daha derinlerinden odaklanmasını sağladığı için ölçme sonuçlarının da istenilen değere yakın çıkması beklenmektedir. Grafikte de bu sonuç karşımıza çıkmaktadır. Gaz basıncının buradaki etkisinin sadece fiziksel olduğu; yani çapak oluşumunu önlemek amacıyla olduğu anlaşılmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Çap} = & 41,1 - (0,000046W) - (0,000585F) - (0,147ON) + (3,33P) + (0,0138ON^2) + (0,58P^2) - \\ & (0,000005W * ON) - (0,000047W * P) + (0,000009F * ON) - (0,000403F * P) + (0,058ON * P) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Genel olarak grafikler incelendiğinde dış kenar boyutu ve daire çap ölçme sonuçları üzerinde etkili parametrenin lazer gücü (W) olduğu görülmektedir. Dış kenar ölçme sonuçlarında lazer gücünü arttırmak istenilen sonuca yaklaşmayı sağlarken, daire çap ölçme sonuçlarında aksi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Diğer parametrelerden kesme ilerlemesi dış kenar ölçme sonuçlarında 4, 6 ve 8 mm malzemeler için aynı etkiyi ortaya çıkarmıştır. Çap ölçme sonuçlarında ise 4 ve 8 mm için kesme ilerlemesinin artması istediğimiz sonucu ortaya çıkarırken 6 mm için tersi oluşmuştur. Genelde Gaz basıncı ve odak noktası parametrelerinin dış kenar ve çap ölçme sonuçları üzerinde çok etkili parametreler olmadığı grafiklerden okunmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada lazer ile kesme işleminde lazer kesmeyi etkileyen birçok parametre içinden en etkili olduğu bilinen lazer gücü, kesme ilerlemesi, odak noktası ve gaz basıncı parametrelerinin farklı kombinasyonda Ç1040 malzemeden 4, 6 ve 8 mm kalınlığında numuneler kesilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çıkarılan bulgulara dayanılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:



Şekil 5. Dış kenar ve daire kesme kenarı

- Dış kenar ve çap ölçme sonuçlarının boyutsal doğruluğu üzerine güç ve kesme ilerlemesi parametrelerinin en etkili parametreler olduğu saptanmıştır.
- Boyutsal doğruluğun sağlanmasında, malzeme kalınlığı da göz önünde bulundurularak, kesim sırasında düşük lazer gücü kullanmak istenilen ölçüye en yakın ölçünün elde edilmesini sağladığı tespit edilmiştir.
- Kalınlığı 4 mm olan malzemede en iyi kesim ve istenilen geometrik boyutunun elde edilmesi için uygun parametreler; lazer gücü 3000 W kesme ilerlemesi 3100 mm/dk, odak noktası 4 mm olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, bu malzemede lazer kesimi yapılırken gaz basıncının boyut

değişimi üzerinde etkili bir parametre olarak görülmediği saptanmıştır.

- 6 mm kalınlığındaki malzemede aynı koşullarda kesilen numunelerin en iyi kesim ve istenilen geometrik boyutu için uygun parametreler; lazer gücü 3000 Watt, kesme ilerlemesi 3100 mm/dak, odak noktası 4 mm ve gaz basıncı 0,5 bar olarak ortaya çıkmıştır.
- 8 mm kalınlığındaki malzemeden kesilen; geometriler için en uygun parametreler, lazer gücü 3000 Watt, kesme ilerlemesi 3100 mm/dak, odak noktası 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu 8 mm' lik numunelerde gaz basıncı kesilen bölgede boyut değişimi yerine kesme sırasında cürufun dışarı atılmasında etkili olduğu görülmüştür.
- 8 mm kalınlığındaki malzemeden kesilen daire geometrisinde, farklı olarak kesme ilerlemesi 2700 mm/dk ve gaz basıncı 0,6 bar olarak belirlenmiştir. Daire geometrisinin lazer kesimi sırasında, lazerin duraklaması gereken herhangi bir köşe olmadığından dolayı ve malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak daha yavaş bir kesme ilerlemesinde daha iyi kesme sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu durum 6 ve 8 mm kalınlıklarda daha net olarak görülmüştür.
- Kesim bölgeleri incelendiğinde; genel olarak gaz basıncının kesilen parçada boyut değişimi üzerine çok etkili olmadığı söylenebilir. Ancak, gaz basıncının kesme sırasında cürufun dışarı püskürtülerek atılması konusunda etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, odak noktasının boyut değişimleri üzerinde etkisi olmadığı; yalnız odak noktasının seçimi malzeme kesme kalitesi üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu durum Şekil 5'de görüldüğü gibi numunelerin kenar görüntülerinden anlaşılmaktadır.

THE INVESTIGATION OF EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON THE DEVIATION AMOUNT FROM NOMINAL DIMENSION DURING CUTTING OF Ç1040 STEEL WITH LASER

Laser cutting method for cutting of metals is widely used in industry. If the appropriate cutting parameters are selected at laser cutting method, burr-free is done without need for tool and without contact with the material and quickly. There are many parameters that determine dimension of cut part with

laser cutting. In this study, AISI 1040 steel has 4, 6 and 8 mm thickness were cut using CO₂ laser cutting method. As cutting parameters, laser power (W), feed rate (F), focus point (ON) and gas pressure (P) were used. 100x100 mm square and 40 mm diameter profiles hole were cut with laser and then deviation from dimension of the outer edge and diameter was measured. According to the study, changes in dimensional stability were observed depend on laser parameters. For 4 mm AISI 1040 material, minimum dimension value on outer edge is 99.535 mm and maximum value is 99.735 mm. In addition, the most important parameters effects on dimension are cutting power and feed rate.

Keywords: laser cutting, laser power, focus point, dimension change

KAYNAKÇA

1. Durukan, Z., "Lazer ile Kesmede İş ve İşleme Parametrelerinin Geometrik ve Boyut Değişimlerine Etkilerinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 40-51 (2010).
2. Kurt, M., "Plastik malzemelerin (PTFE ve POM) lazer ile kesilme özelliklerinin deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 6-7 (2006).
3. <http://www.konlazer.com/tr/main.swf>, (2010).
4. Cemal, M., "Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları" Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya*, 32-37 (2006).
5. Taşal, E., "Yüksek güçlü sürekli-dalgalı infared karbondioksit lazer dizaynı" Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*, 36-40 (1997).
6. Anık, S., Ögür, A., Vural, M., "Termik Kesme Teknolojisi" *Gedik Eğitim Vakfı 2*, İstanbul, 115-118 (1996).
7. Güven, O., Ünal, S., "Lazer Kesme", Araştırma Yazısı, *Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin*, 1-2 (2002).
8. Sevinç, A., "CNC Lazer Kesme Tezgahında Üç Boyutlu Sac Parçaların Kesme ve Delik Delme İşlemlerinin CAD-CAM-CNC Entegrasyonu ile Yapılması" *Tofaş ARGE Notları*, Bursa, 1-3 (2000).
9. Kaya, S., Demirören H., Korkut M. H., "St-37 düşük alaşımli çelik ve AISI 304, 304L, 316 östenitik paslanmaz çelik numunelerinin şeker fabrikaları kule difüzör ünitesindeki korozyon davranışlarının deneysel araştırılması" *Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğt. Böl.*, Elazığ, (2003).
10. Öner, U., "Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Aralığı ve Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 14 (2008).
11. Bystronic Lazer AG, "Byspeed Kullanma Klavuzu", İsviçre, 229-231, (2002).

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıtıldığı yazılar yayımlanabilir.

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

"Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of MECHANICAL DESIGN AND PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıtıldığı yazılardır.

Hakem değerlendirmesi için makaleler, biri orjinal olmak üzere dört basılmış kopya ile birlikte bir de elektronik kopyası Makina Tasarım ve İmalat Derneği Yayın Kurulu'na bir başvuru formu ile gönderilmelidir. Bu başvuru formu <http://www.me.metu.edu.tr/matim> sayfasından bulunabilir.

Yazarlar, yayımlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik ve bir basılmış kopya olarak göndermelidir. Elektronik kopya makalenin basılmış halinin aynısı olmalıdır. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır. Makalenin kaydedildiği CD veya e-mail kullanılan kelime-işlemci paket programı ve sürümü belirtilerek gönderilmelidir.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
 - Yazar(lar) ad(lar), ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
 - Özet ve anahtar kelimeler
 - Makalenin ana kısmı
 - Teşekkür (gerekli ise)
 - İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
 - Kaynakça
 - Ek(ler) varsa
- Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek, gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,
- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "i" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğinin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Özel koşullarda renkli resim baskısı yapılabilecektir.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

Dergi Makalesi

1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376. Kitap
2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983. Rapor

3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980.

Kongre Makalesi

4. Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır. Şekillerin orjinalleri de dahil olmak üzere makale üç kopya gönderilmelidir.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.

1. Örnek dip notu