



**T. C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DEĞİŞKEN YÜKLEME DURUMUNDA
ŞEKİLLENDİRME SINIR
DİYAGRAMLARININ ELDE EDİLMESİ**

**GÜRKAN ATAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**KASIM-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Gürkan ATAŞ tarafından hazırlanan “Değişken Yükleme Durumunda Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Elde Edilmesi” adlı tez çalışması 22/09/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Danışman

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Üye

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI

Üye

Doç. Dr. M. Hüseyin Çetin

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KTÜN BAP tarafından 201010027 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Gürkan ATAŞ
Tarih: 22.10.2021

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DEĞİŞKEN YÜKLEME DURUMUNDA ŞEKİLENDİRME SINIR
DİYAGRAMLARININ ELDE EDİLMESİ

GÜRKAN ATAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2021, 69 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Doç. Dr. M. Hüseyin ÇETİN

Sac şekillendirme işlemlerinde, şekillendirilen parçalarda herhangi bir kusur oluşmadan istenilen geometriyi elde etmek için proses parametrelerini deneme yanılma yolu ile bulmak oldukça zor ve pahalı bir yöntemdir, hatta bazı durumlarda mümkün değildir. Bu nedenle proses tasarımı ve parametreleri genellikle sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilir. Bu analizlerin yapılmasında ilk adım üretilecek parçanın malzeme parametrelerinin tespitidir. Bu parametrelerin en önemlileri çekme testinden elde edilen akma eğrisi ve düzlem dışı şekillendirme testlerinden olan Nakajima testinden elde edilen şekillendirme sınır eğrileridir (ŞŞE).

Günümüz teknolojisinde sac şekillendirme proseslerinde darbeli olarak uygulanan kuvvetler ile şekillendirilebilirlik sınırları genişletilmektedir. Daha önceki çalışmalarda monoton yükleme durumunda ŞSE'ler verilirken bu çalışmada buna ilaveten darbeli yükleme durumunda oluşan ŞSE'lerde üretilmiştir.

Bu tez kapsamında otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan AA5754-O levhalar kullanılmıştır. Oda sıcaklığında monoton ve darbeli yükleme durumunda (ŞSE)'ler Nakajima testi ile elde edilmiştir. Kullanılan malzeme için monoton ve darbeli yükleme parametreleri mümkün olan aralıklar için bir Taguchi deney tasarım şemasına göre belirlenmiştir. Tüm testler üç defa tekrar edilmiştir. Şekillendirilen parçalarda oluşan birim şekil değişimleri (BŞD) Asame 4.1. sistemi kullanılarak ölçülmüştür. ŞSE'ler ölçülen BŞD değerleri kullanılarak ISO-12004-2 (2008) standardına göre oluşturulmuştur. Monoton ve darbeli yükleme sonucu oluşturulan ŞSE'ler kıyaslandığında genel olarak şekillendirilebilirlik açısından anlamlı bir artış elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA5754-O, değişken yükleme, sac şekillendirme, Nakajima testi, şekillendirme sınır eğrisi

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF FORMING LIMIT DIAGRAMS FOR PULSATING LOADING

GÜRKAN ATAŞ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of mechanical engineering**

Adviser: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2021, 69 Pages

**Jury
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LIVATYALI
Doç. Dr. M. Hüseyin ÇETİN**

It is difficult and expensive to find the optimum process parameters to form sheet metal parts without any geometric defects by trial and error, and it is not even possible in some cases. The design of the process and its parameters are usually estimated using the finite element method. The first and most important step in making these analyses is to determine the material properties of the workpiece. The most important of these parameters are the flow curve from the tensile test and forming limit curves (FLC) obtained using the Nakajima test, which is an out-of-plane forming test.

In today's technology, the limits of formability are increased by applying forming forces in pulsating form. The FLC's available in the literature are produced under monotonous loading conditions. In this study, FLC's were developed under pulsating loading conditions as well as monotonous ones.

In this thesis, the FLC of AA5754-O, which is widely used in the automotive industry, was obtained at room temperature using the Nakajima test. Monotonous and pulsating loading parameters were applied on test specimens in possible ranges under a Taguchi experimental design scheme. The tests were performed under optimum parameters with three repetitions for each test sample. The strains on formed parts were measured using the Asame 4.1 system. FLC's were generated based on the measured strains according to the ISO-12004-2(2008) standard. Consequently, based on the FLC's, a meaningful increase in overall formability was obtained by pulsating forces as compared to monotonous tests.

Keywords: AA5754-O, variable loading, sheet forming, Nakajima test, forming limit curve

ÖNSÖZ

Sac şekillendirme prosesleri gerçekleştirilmeden önce prosesin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında modellemesi ve simülasyonu yapılabilmektedir. Bu sayede önceden ortaya çıkabilecek şekillendirme kusurları öngörülebilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) analizler için birtakım malzeme ve proses parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerden bir tanesi de, sac malzemelerin hangi sınırlara kadar şekillendirilebileceği bilgisini veren Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞŞE) verileridir.

Ülkemizde henüz sonlu elemanlar yazılımı ile ŞŞE'ler kullanılarak kalıp tasarımı yeterli seviyede yapılmamaktadır. Özellikle ŞŞE'ler yurtdışından temin edilmekte veya literatürden alınmaktadır. Ülkemizde ŞŞE'lerin ticari olarak elde edilmesine yönelik çalışmalar henüz yenidir. Sac malzemelerde şekillendirilebilirliği artırmak için aynı malzemenin daha kalın hali veya bir üst serisi kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında aynı malzeme için kalınlığı ve serisini değiştirmeden şekillendirilebilirliği artırmak için literatürde yeni sayılabilecek değişken yükleme durumuna göre ŞŞE'ler elde edilmiştir.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan 5754 alaşımlı alüminyum sac malzemenin Nakajima testi ile şekillendirme sınır eğrileri hem monoton hem de değişken yükleme durumu için incelenmiştir.

Konya Teknik Üniversitesi Bap Koordinatörlüğü'nün 201010027 Nolu BAP tez projesi kapsamında verdiği destek için teşekkür ederim.

Bizleri bu süreçte yönlendiren ve emeğini esirgemeyen başta danışmanın Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI olmak üzere Doç. Dr. Murat Dilmeç, Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ hocalara en içten şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Eşim Zekiye Hanıma verdiği desteklerden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Sevgilerimi kendilerine iletiyorum. Bizi bugünlere getiren babam Ülkay ATAŞ'a teşekkür ederim. Her konuda yanımda olmaya çalışan kardeşim Reyhan ATAŞ'a da sevgilerimi iletiyorum.

Gürkan ATAŞ
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Alaşımli Alüminyum Saclar	5
2.2.Sac Malzemelerin Şekillendirilebilirliğini Belirlemede Kullanılan Deneyler.....	7
2.2.1.Benzetim deneyleri	7
2.2.2.Sınır kubbe yüksekliği	8
2.2.3. Çekme Testi	9
2.2.4. Şekillendirme sınır eğrisi	9
2.3. Şekillendirme Sınır Eğrisini Belirlemede Kullanılan Testler	10
2.4.Nakajima Testi	12
2.4.1.Gridleme	12
2.4.2. Şekillendirme	13
2.4.3. Gridlerin ölçülmesi	14
2.5. Değişken Yükleme Şekillendirme	15
2.6.Literatür Analizi.....	19
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
3.1. Nakajima Test Kalıplarının Tasarımı	21
3.2. Numunelerin hazırlanması	23

3.2.1. Numune Geometrilerinin Belirlenmesi.....	23
3.2.2. Isıl İşlem	25
3.2.3. Numunelerin Gridlenmesi.....	26
3.2.4. Grid analiziyle BŞD ölçme yöntemi	28
3.4. Test Ünitesi Kontrol Yazılımında Değişken Yükleme Modifikasyonu.....	34
3.5. Değişken Yükleme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	36
3.6. Sınır BŞD’lerin Hesaplanması.....	39
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	42
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε_1	Majör BŞD
ε_2	Minör BŞD
H	Şişme Yüksekliği
Hz	Frekans
mm	milimetre
O	O temperli
P_0	Ortalama Basınç

Kısaltmalar

HŞ	Hidro-Şekillendirme
LDH	Sınır Kubbe Yüksekliği
SÇO	Sınır Çekme Oranı
SEY	Sonlu Elemanlar Analizi
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
ŞSE	Şekillendirme Sınır Eğrisi
THŞ	Tüp Hidroşekillendirme

1. GİRİŞ

Metal malzemeler haddeleme gibi üretim yöntemleri ile levha haline getirilebilir. Levha haline getirilen sac malzemenin et kalınlığı 6 mm altında ise sac, üzerinde bir kalınlığa sahip ise plaka olarak adlandırılır. Sac metaller modern haddehanelerde üretildikten sonra hidroşekillendirme, klasik derin çekme, bükme, germe vb. şekillendirme yöntemleri ile farklı geometrilere şekillendirilebilmektedir. Şekillendirilen parçalar hava ve kara taşıtlarında, gıda, inşaat gibi çeşitli endüstri sektörlerinde kullanılmaktadır.

Sac metal şekillendirme yöntemleri, imalat usulleri içinde oldukça geniş bir kullanıma sahiptir. Bu yöntemlerden olan derin çekme ve hidroşekillendirme işlemlerinde genellikle, iki kalıp arasına baskı plakası kuvvetiyle sıkıştırılan sac, basınç ve/veya ıstampa yardımıyla şekillendirilir. Bu proseslerde amaç, sac da yırtılma, boyun verme ve buruşma gibi kusurlar oluşmadan istenilen geometriyi elde etmektir. Bu kusurların oluşmasını önlemek için sac metal malzemenin birtakım mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Şekillendirme işlemi yapılmadan önce, bu mekanik özellikler doğrultusunda sacın şekillendirme kabiliyeti hakkında öngörü yapılabilmektedir.

Endüstri sektörlerinin ihtiyaç duyduğu geometri ve mekanik özellikler doğrultusunda farklı türde sac metaller kullanılmaktadır. Bu sac metallerin başında yaygın kullanılan alüminyum, demir ve çelik alaşımları gelmektedir. Alüminyum alaşımları; hafif, yüksek mukavemete sahip ve korozyona karşı dayanımlı olmalarından dolayı endüstri sektörlerinde bu metalin kullanımını ön plana çıkmaktadır. Örneğin 5000-7000 serisi alüminyum alaşımları ağırlığına oranla çok yüksek mukavemete sahip olmaları nedeniyle, hava araçları ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Endüstri sektöründe kullanılan her bir malzeme gibi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini belirlemek gerekmektedir.

Sac metaller hasar oluşmadan ancak belirli limitlere kadar şekillendirilebilir. Özellikle çoğu önemli sektörün bazı departmanlarında sac şekillendirme işlemi kullanıldığından dolayı, herhangi bir ürün imalatı gerçekleştirilmeden önce sonlu elemanlar analizleri (SEA) yapılmaktadır. Bu sayede şekillendirme öncesine oluşabilecek kusurların tahmin edilebilmektedir. Bu analizler ve öngörüler

doğrultusunda kalıp tasarımı revize edilir, prosesin yükleme profilleri(basınç ve/veya mekanik kuvvetler) artırılabilir veya azaltılabilmektedir. Tasarım sürecinde malzeme seçimi de önem arz etmektedir. SEA sürecinde malzeme çeşidinin ve sac kalınlığının bu proses için uygun olup olmadığı da karar verilir. Sac malzemelerin şekillendirilmesi işlemi öncesi yapılan SEA'lar sonucu deneme yanılma sayısı azaltılabilir, bu durum ise iş planlanması, sarf edilen iş gücü ve maliyet açısından tasarruf sağlayabilmektedir.

Çekme testi sonucunda elastiklik modülü, pekleşme üssü, gerilme-birim şekillendirme eğrisi, akma dayanımı vb. diğer mekanik özellikler elde edilir. SEA yazılımlarına bu mekanik özellikler girilerek yapılan analizler sonucu sacda ki şekil değiştirme miktarı tahmin edilebilmektedir. İmalat proseslerinin analizlerini modellemek için çekme testinden elde edilen veriler yeterli olmayabilir. Çünkü sac şekillendirme işlemlerinde farklı Birim Şekil Değiştirme (BŞD) kombinasyonları oluşmaktadır. Bundan dolayı çekme testinden tek ekseninde elde edilen mekanik özellikler iş parçasının hasara uğrayıp uğramadığını belirlemek için yetersiz kalmaktadır.

Buna ek olarak, SEA yazılımına malzemenin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini, yani malzeme üzerinde oluşan deformasyon miktarı ve tiplerine bağlı olarak güvenilir, kritik ve hata bölgelerini gösteren en önemli araç olan, Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) verilerinin de tanıtılması gereklidir. Her bir sac malzeme kendi şekillendirilebilme kabiliyetlerini, BŞD limitlerini ve hasar ve hasarsız şekillendirme bölgelerini gösteren ŞSE'ye sahiptir. ŞSE'lerin teorik olarak belirlenmesi mümkün olabilir ancak, daha gerçek sonuçlar elde edebilmek için, genellikle deneysel olarak belirlenmesi daha doğru sonuçlar vermektedir. ŞSE'lerin deneysel olarak elde edilmesi oldukça zaman alıcı ve özel ölçme sistemleri gerektiren bir çalışmadır. ŞSE testleri standartlaştırılmıştır. (Banabic ve ark., 2000).

ŞSE'ler genel olarak Nakajima (gerdirme) veya Marciniak (derin çekme) testlerinden elde edilir (Lewison, 1999). Gerçek şekillendirme proseslerinde oluşan eğilme gerilmeleri Nakajima testinde de meydana gelmektedir. Gerçek şekillendirme proseslerine benzer olmasından ve geniş bir aralıkta BŞD yolu elde edilebilmesinden dolayı, Nakajima testi ŞSE'leri belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır (Raghavan, 1995).

Önceleri ŞSE'ler ASTM-E-2218-02 (Ağustos-2002) standardına göre elde ediliyordu. Ancak bu standartta Nakajima testinin uygulanışı ile ilgili birçok ayrıntı ve sınır BŞD değerlerinin nasıl belirleneceği belirtilmemiştir. Çalışmalarda farklı numune geometrileri, yağlayıcılar ve takımlar kullanıldığından, hasar başlangıcı için kesin bir değer belirlemek olanaksızdır ve birçok araştırmacı farklı kabuller yapmaktadır (Jahromi ve ark., 2006).

2008 yılında yayımlanan ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardı bu belirsizlikleri ortadan kaldırmış ve farklı kişilerin yaptığı üç değerlendirmelerde yakın ve güvenilir ŞSE'lerin elde edilmesini sağlamıştır (Situ, 2008). Bu standarda göre, numunenin hasar bölgesine dik çizilen birkaç ortogonal kesitteki majör ve minör BŞD'lerin 1. ve 2. türevleri alınır. Elde edilen noktalardan çizilen parabolün tepe noktası sınır BŞD değeri olarak alınmaktadır. Sınır BŞD'ler kullanılarak şekillendirme sınır eğrisi oluşturulmaktadır.

Bu tezin temel amacı, endüstride şekillendirme proseslerinde yaygın olarak kullanılan alaşımlı alüminyum 5754-O serisi malzemenin nakajima testi kullanılarak ŞSE'lerinin monoton ve değişken yükleme durumunda elde edilmesi ve şekillendirilebilirlik açısından kıyaslanmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak Nakajima testindeki yarı küresel ıstampaya belirli bir mesafe ilerlemeden sonra geri çekme ve ilerletme hareketi verilmiştir. Bu yükleme çeşidi değişken yükleme olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda ıstampa monoton ilerlemesiyle de Nakajima testleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın 2.bölümünde AA5754 malzemesinin endüstride kullanım alanları, literatürde sac metallerde şekillendirilebilirliği belirlemede kullanılan metotlar, ŞSE'yi belirlemede kullanılan deneyler ve salınımlı sac hidroşekillendirme prosesleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.bölümde test numunelerine uygulanan ısıtma işleminden, Taguchi metodu ile şekillendirme esnasında yarı küresel ıstampanın optimum salınım parametrelerinin (frekans ve genlik) belirlenmesi, ISO 12004-2 standardında kullanılan Nakajima test numune takımının hazırlanması ve gridleme işlemin yapılmasından bahsedilmiştir. Aynı zamanda Konya Teknik Üniversitesi bünyesindeki Hidroşekillendirme Laboratuvarında ŞSE'nin değişken ve monoton yükleme durumunda elde edilmesi için Nakajima

testlerinin yapılması anlatılmıştır. Numunelerde oluşan BŞD dağılımlarını Asame 4.1 yazılımı kullanılarak bulunmuştur. Asame 4.1 yazılımı şekillendirme sonucunda numune yüzeyinde oluşturulan gridlerin şekil değişimini ölçen bir programdır.

4 ve 5.bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler verilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ilk olarak kullanılan Al 5754-O malzemesi ile ilgili bilgi verilmiştir. Sac metallerin şekillendirilebilirlik kabiliyet sınırlarını belirlemede kullanılan deneyler genel olarak anlatılmıştır. Sonra sac malzeme şekillendirme işleminden ve salınlı sac hidroşekillendirme ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.1. Alaşımli Alüminyum Saclar

Alüminyum yeryüzünde en çok bulunan ikinci element olup, gri renkli, hafif ve düşük özgül ağırlığa sahiptir. Aynı zamanda atmosferik şartlara, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvıya ve gaza karşı dayanıklıdır. Alüminyum malzemelerde korozyona uğrayan yüzeyde meydana gelen oksit tabakası oldukça incedir ve bu durumda oksitlenmeyi engeller. Gözle görülemeyen bu oksit tabakası demirde olduğu gibi renk değiştirmez ve parçalanarak kopmaz. Saf alüminyum düşük sertliğe ve dayanıma sahip olmasına karşın bazı alüminyum alaşımları yapı çeliklerine eşit hatta bazen daha fazla mukavemet ve dayanıma sahip olabilirler (Davis, 1993).

Alüminyum alaşımları sahip olduğu mekanik özellikler ve yeryüzünde saf alüminyumun bol miktarda bulunması bakımından endüstri sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bir mühendislik malzemesidir. Alüminyum ve alaşımları, çelikten sonra en çok tercih edilen malzemedir. Bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinko alüminyuma katılan başlıca alaşım elementleridir. Alüminyum alaşımlarının mikro yapısındaki alaşım elementlerinin çeşitliliği ve yüzde bulunma miktarına bağlı olarak mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir.

Alüminyum alaşımlarının üretilmesini döküm ve dövme alaşımları olarak iki grupta kategorize edebiliriz. Alüminyum dövme alaşımlarının plastik deformasyon kabiliyeti döküm alaşımlarına göre daha iyidir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir: 1xxx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx'dir. Her bir seri mukavemet ve şekillendirilebilirlik açısından avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Smith,2001).

Bu çalışmada kullanılan AA5754-O temperli malzemenin ait olduğu seri 5xxx'dir. Bu serinin özelliği birincil alaşım elementi magnezyumdur. 5xxx serisi

mekanik ve kimyasal özellikler bakımından yüksek mukavemete, kaynaklanabilire ve yüksek korozyon direncine (deniz suyu ve bazı kimyasallara karşı) sahiptir. Bu özellikleri bakımından otomotiv, havacılık, gemi sanayisinde birçok kullanım alanına sahiptir

Alüminyum Sac malzemelerin Kullanım Alanları

Alüminyum farklı boyutlarda ve geometrilerde imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Bu malzeme ile üretilen parçalar endüstri sektörlerinde çeşitlilik arz etmektedir ve bu durumda kullanıcılara geniş bir seçim imkânı sunmaktadır. Sürekli imalat sistemlerinden ekstrüzyon, derin çekme, haddeleme, hidroşekillendirme gibi üretim yöntemlerine uygundur. Alüminyum metalinin işlenmesinde iş yükü açısından nispeten az uğraş gerektirmesi maliyetleri düşürmektedir. Alüminyumun diğer metallere nazaran ergime sıcaklığı düşüktür. Bu durumun avantajı kullanılacak kalıp malzemeler konusunda farklı çeşitlilik sunabilmesidir (Çakanyıldırım ve ark., 2021).

Alüminyum demir ve çeliğe göre 2-3 kat daha düşük özgül ağırlığa sahip olduğu için taşıtların ağırlığını azaltmak için kullanılması büyük avantaj sağlar. Geçmişten günümüze teknolojin ilerlemesiyle otomobil üreticileri taşıtların ağırlığını azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalarda bulunmaktadır. Otomobiller çeşitli ve çok sayıda bileşenden oluşur ve ağırlığı azaltmak için farklı yaklaşımlar sunabilir. Taşıtların gövdesindeki ve alt düzen bileşenlerde çeşitli malzemelerden yapılmış parçalar bulunmaktadır ve bunların ağırlığı azaltmak için bir odak noktasıdır.

Günümüzde ortalama bir otomobilde farklı alüminyum parçalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları silindir kapağı, dişli kutuları, jantları; levha ve ekstrüzyon yöntemiyle imal edilen radyatörler, tamponlar, koltuk rayları, yan çarpma çubukları vs. gelmektedir. Bu parçalar bir aracın ortalama ağırlığın yaklaşık yüzde %10-15'ni oluşturmaktadır. Otomobilde daha hafif malzemeler kullanmak demek, yakıt tüketiminde tasarruf ve aynı zamanda daha düşük egzoz emisyon değeri demektir. (Başer,2012).

Havacılık endüstrisinde tasarımcılar, sürekli bir performans artışı elde etmek için devamlı olarak hafif ve güçlü malzemeler üzerine araştırmalar ve bilimsel yaklaşımlar

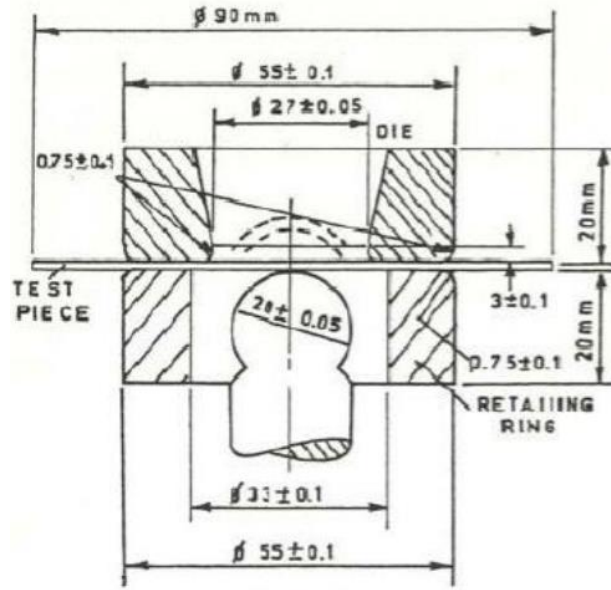
geliştirmektedirler. Havacılıkta performans artışını sağlamanın ve ağırlığı azaltmanın önemli unsurlarından bir taneside uçak gövdesidir. En verimli yollardan bir taneside gövde de ağırlık olarak hafif malzemeler kullanmaktır. Bu durum ise alaşımli alüminyumların uçak gövdesi olarak kullanılmasındaki üstünlüğü artırmaktadır. Havacılıkta kompozit malzeme kullanımı yıldan yıla artmaktadır bu durum alüminyumun kullanılmasını sınırlandıracak gibi gözükse de, önemli bir uçak gövdesi malzemesi olarak kalmaya devam edecektir (Campbell, 2006).

2.2.Sac Malzemelerin Şekillendirilebilirliğini Belirlemede Kullanılan Deneyler

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini ölçmek ve değerlendirmek için farklı test metotları vardır. Sac malzemelerin şekillendirilebilirlik limitlerini sayısal ya da grafiksel olarak belirlemede kullanılan deneyleri dört gruba ayrılır. Bunlar benzetim (Olsen, Erichsen, Swift Cup, Hecker, Fukui vb.), sınır kubbe yüksekliği (Limiting Dome Height), çekme testi ve şekillendirme sınır eğrisinin (ŞSE) oluşturulduğu deneylerdir (Dilmeç,2014).

2.2.1.Benzetim deneyleri

Benzetim deneylerinde gerçek şekillendirme işlemelerine benzer deformasyonlar oluşturulur. Şekil 2.1.'deki gibi Erichsen, Swift Cup vb. benzetim deneylerin de iki kalıp arasına sıkıştırılan sac silindirik ıstampa ya da yarı küresel ıstampa ile yırtılncaya şekillendirilir. Elde edilen ıstampanın ilerleme miktarı ya da kubbe yüksekliği milimetre olarak şekillendirilebilirliğin bir ölçüsüdür. Kubbe yüksekliği yırtılmanın olduğu noktada ölçülür (Türköz,2009).



Şekil 2.1. Erichsen deneyi (Banabic,2000)

Malzemenin kalitesinin yanı sıra malzemenin boyutu, yağlama durumu, deneylerde kullanılan ekipmanlar ve standartları elde edilen sonuçlarını etkilemektedir. Benzetim deneyleri, şekillendirme proseslerindeki kalıp tasarımı, kalıplar ve sac arasındaki yağlama durumu ile ilgili bize yeterli bilgiyi vermez. Bu yüzden gerçek şekillendirme işlemlerinde şekillendirilebilirlik hakkında yeterli bir bilgi sağlamamaktadır. Bu deneyler malzemelerin şekillendirilebilirliğini kalitatif olarak karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır (Dilmeç, 2014).

2.2.2.Sınır kubbe yüksekliği

Bu deneyde farklı genişlikte deney numunelerine dairesel bir süzdürme çubuğu ile kaymayacak şekilde baskı kuvveti uygulanır. Ardından 100 mm çapında kubbe şeklinde bir ıstampa ile hasar oluşuncaya kadar gerdirilir. Yırtılmanın başladığı ıstampa ilerleme miktarı şekillendirilebilirliğin bir ölçüsü olarak belirtilir. Bu deneyde sacda düzlem BŞD oluşur. Düzleme BŞD; numune boyu uzarken kalınlığın azaldığı BŞD kombinasyonudur. Sac şekillendirme proseslerinde pratikte yırtılma durumu düzlem BŞD halinde oluşur. Bu sebeple düzlem BŞD durumunda ki sınır kubbe yüksekliği (LDH) şekillendirilebilirliğin bir ölçüsü olarak alınır (Banabic ve ark., 2000).

2.2.3. Çekme Testi

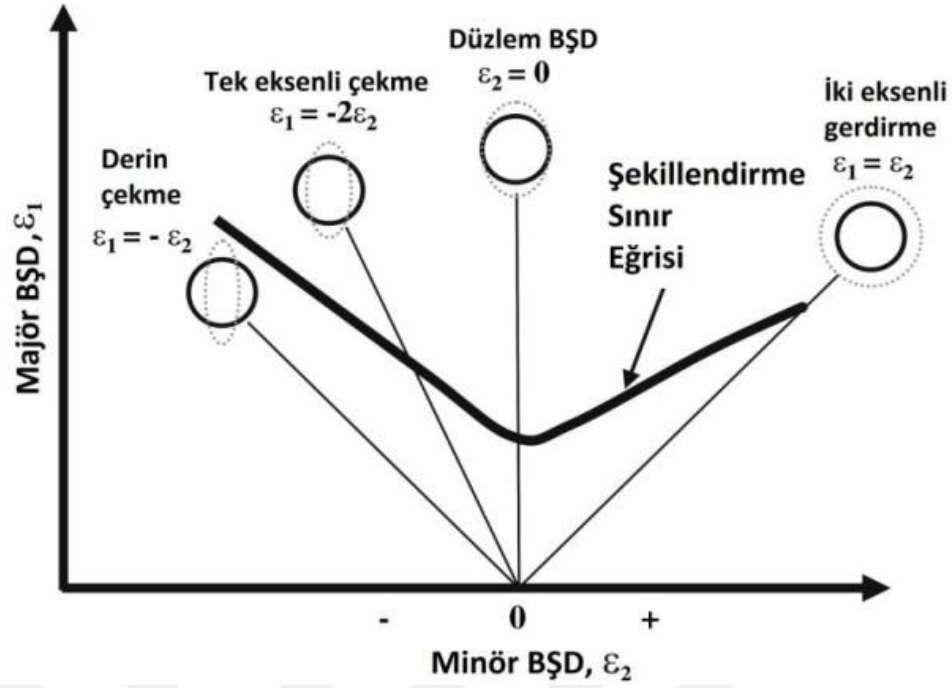
Çekme testi, malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılmaktadır. Çekme testinden elde edilen mühendislik akma eğrisi, test numunesinin tek eksenli gerilme altındaki davranışını temsil etmektedir. Sac metal şekillendirme proseslerinde farklı eksenlerde gerilme kombinasyonları oluşmaktadır. Çekme testi her gerilme kombinasyonunu temsil etmemektedir. ŞSE’de ise çekme testinden farklı olarak birden fazla eksen doğrultusunda gerilme oluştuğunda malzemenin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini veren bir araçtır ve aşağıda daha detaylıca incelenecektir.

2.2.4. Şekillendirme sınır eğrisi

Sac malzemelerin şekillendirme işlemlerinden sonra şekillendirilen parça üzerinde herhangi bir kusur oluşmaksızın gerçekleştirebilmek için, malzeme üzerinde oluşan BŞD tiplerini ve miktarlarını bilmek gerekmektedir.

Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD)’ler sac metal şekillendirme işlemlerinde oluşabilecek farklı çeşit BŞD kombinasyonlarını içermelidir. Bunlar tek eksenli çekme, düzlem birim şekil değiştirme ve iki eksenli gerdirme hallerinin hepsini içermektedir. Bu sayede sac malzemenin tüm BŞD kombinasyonlarında şekillendirilebilirlik davranışları görülebilmektedir. Sac metal endüstrisinde ŞSD’ler kullanılmakta ve yaygınlaşmaktadır. Sac malzemelerin üzerinde oluşan çeşitli gerilme durumları sonucunda oluşan şekillendirme limitlerinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir test metottur. Her bir sac malzeme kendi deformasyon limitlerini gösteren diyagrama sahiptir. Farklı kalınlığa sahip aynı tür malzemede bile şekillendirme sınır diyagramı aynı olmamaktadır (Toros, 2014).

Şekillendirme sınır diyagramının deneysel olarak elde edilmesi oldukça zaman alıcı ve özel ölçüm sistemleri gerektiren bir çalışmadır. Şekillendirme sınır diyagramı ilk defa 1963 yılında Keeler ve Backofen (1964 ve 1968) yılında Goodwin (1968) tarafından ortaya atılmıştır. Keeler büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının pozitif olduğu kısmını (şekillendirme sınır diyagramının sağ tarafı) geliştirmiştir. Goodwin ise büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının negatif olduğu kısmı (şekillendirme sınır diyagramının sol tarafı) geliştirmiştir. Şekil 2.2.’de Şekillendirme Sınır Diyagramı deformasyon tipleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2.Şekillendirme sınır diyagramında farklı deformasyon tipleri ve şekillendirme sınır eğrisi (Lamberts, 2005)

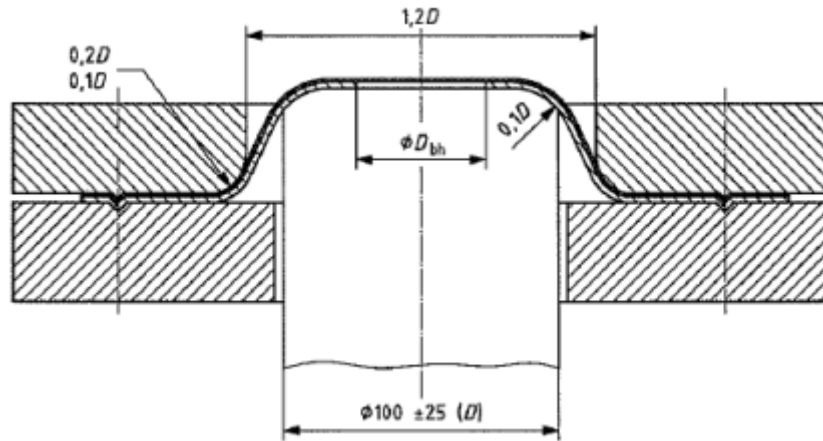
Şekil 2'de de görüldüğü gibi şekillendirme sınır diyagramlarının eksenleri majör ve minör BŞD'ler olmak üzere iki tanedir. Diyagramda gösterilen BŞD'ler gerçek birim deformasyonlardır. Şekillendirme Sınır Diyagramları, malzemenin şekillendirme esnasında oluşan çeşitli deformasyon tiplerini gösterir. Şekillendirilen malzeme üzerinde iki yönde oluşan deformasyonlardan bir tanesi negatif ise malzemede oluşan deformasyon çeşidi çekme tipidir. Her ikisi de pozitif oluşan deformasyon çeşidi gerdirmedir. Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) ise her BŞD kombinasyonun dağılımından standartlara göre hesaplanarak sınır BŞD'lerden eğri geçirilerek çizilmektedir.

2.3. Şekillendirme Sınır Eğrisini Belirlemede Kullanılan Testler

Literatürde alüminyum, çelik vs. gibi birçok malzemenin ŞSE'lerinin belirlenebilmesi üzerine geliştirilmiş ve standartlaştırılmış test yöntemleri bulunmaktadır. Tek eksenli çekme testi, hidrolik şişirme deneyi, ıstampa ile gerdirmeye deneyi, Hecker deneyi, Nakazima deneyi ve Marciniak deneyi, malzemelerin şekillendirme diyagramlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemlerindendir. Tek eksenli çekme testinde sadece şekillendirme sınır diyagramının negatif bölgesi elde edilebilmektedir. Diğer bir test yöntemi ise ıstampa ile farklı deformasyon tipleri elde edebilmek için çeşitli geometrilerde hazırlanmış test

numunelerinin ıstampa ile sacın birbirine temas ettiği yüzeye herhangi bir yağlayıcı kullanmadan yani sürtünmeli bir şekilde şekillendirilmesi yöntemidir. Burada kalıplar arasında sıkıştırılmış numune yarı küresel bir ıstampa (erkek kalıp) aracılığıyla gerdirilerek şekillendirilmektedir. Bu test yönteminde deneysel iş yükü oldukça fazla sayılabilir. Farklı sürtünme katsayılarının elde edilmesi ile aynı kalıp ve malzeme geometrileri üzerinde şekillendirme sınır diyagramlarının sağ tarafı Hecker testi ile elde edilebilmektedir (Banabic ve ark.,2000).

Marciniak testinde ıstampanın ortası oyuklu bir biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte iş parçası ve kalıp arasında ortasında delik bulunan bir ara parça bulunmaktadır. Şekil 2.3.'de Marciniak testinin şematik görünümü verilmiştir. Test numunesinin düzlem kısmında hasar meydana getirmek için bu ara parça kullanılır. Aksi takdirde ıstampanın kenarlarında yırtılma olacaktır. Karmaşık geometrilere sahip ıstampa ve kalıplar gerektirmektedir. Bununla birlikte sadece pozitif bölgedeki deformasyon sınırlarının belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Ancak farklı geometrilerdeki iş parçalarının ve ara elemanlarının hazırlanması durumunda tüm şekillendirme sınır diyagramları elde edilebilmektedir. Son olarak Nakajima testi ile bütün şekillendirme sınır diyagramını farklı genişlikteki deney numunelerinin kullanılması ile elde etmek mümkündür (Affronti,2018).

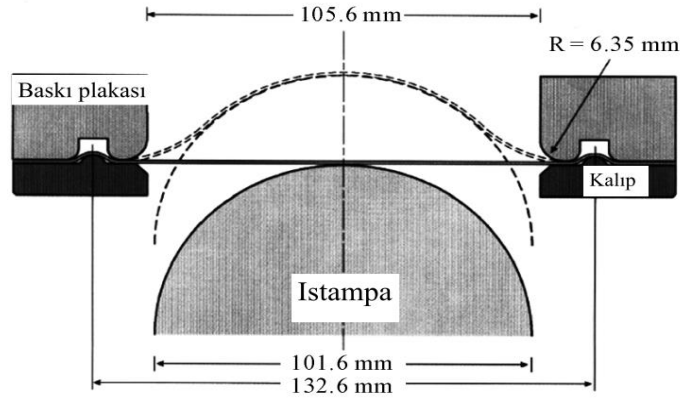


Şekil 2.3. Marcianak testi şematik gösterimi (ISO12004-2-2008)

Bu tez kapsamında Nakajima testi kullanılacağı için bu test metodu detaylı olarak ayrı bir başlıkta verilecektir.

2.4.Nakajima Testi

Sac metal malzemelerinin şekillendirme sınır eğrilerinin elde edilmesinde sık olarak kullanılan bir test yöntemlerinden bir tanesidir. İki kalıp arasına kaymayacak şekilde sıkıştırılan farklı boyutlardaki sacların yarı küresel ıstampa kullanılarak hasar oluşuncaya kadar şekil değiştirmesi prensibine dayanmaktadır (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Nakajima test takımının şematik gösterimi (ISO12004-2-2008)

Bu test yönteminin özelliği malzemeye bağlı olarak en fazla şekil değişimi gerçekleştirmesidir. Bu yüzden kullanılan test numuneleri yüksek uzama şartlarında sac malzemenin şekil değiştirmesine izin veren boyutlardadır. (Galanulis,2005).

Çeşitli boyutlarda numunelerin kullanımı ile farklı çekme derinlikleri ve farklı şekillendirme şartları sac malzemede meydana gelmektedir. Deformasyon sonucu boyunlaşma bölgesinde veya yırtılma bölgesine komşu şekil değiştirmiş gridler yardımıyla minör ve majör BŞD'ler ölçülür. Bu değerler ŞSD üzerine işaretlenerek ŞSE'e elde edilir. Nakajima testi ile ŞSE'lerin deneysel olarak elde edilmesi gridleme, şekillendirme ve ölçme aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.4.1.Gridleme

1965 yılında Keeler tarafından grid analiziyle ölçme önerilmiştir. Bu tarihten sonra farklı yaklaşımlarda eklenilerek bu yöntem kullanılmıştır. Farklı genişlikteki sac test numunelerinin bir yüzeyine şekillendirme işlemi yapılmadan önce kare, daire vb. farklı geometrilerde gridler yapılır. Sac yüzeyine Şekil 5'de görülen ve grid boyutları 1.25~5 mm aralığında değişen çeşitli şekiller oluşturulabilir. ISO-12004-2 standardında,

şekillendirilen test numunesinin eğrilik yarıçapı 50 mm olduğu zaman, 2.5 mm ye kadar gridler kullanmak önerilmektedir. Yani eğriliğin neden olacağı hatanın kabul edilebilir olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle aliminyum alaşımlarında genellikle 2.5 mm gridler kullanılmaktadır.



Şekil 2.5. Grid analizi için yaygın olarak kullanılan grid şablonları (ASAME Reference Manual)

Sac yüzeyine grid yapıları oluşturmanın birkaç farkı yöntemi vardır. Bu yöntemlerden bazıları serigrafi (ipek baskı), fotokimyasal gridleme, elektrokimyasal dağlama ve lazer ile oymadır (Siegert ve ark, 1994).

En uygun yöntem seçilirken, sac yüzeyindeki gridlerin şekil değişimi esnasında yüzeyden dökülmemesi ve aynı zamanda gridlerin boyutsal olarak şekil değiştirebilmesi gerekmektedir. Yapılan proses esnasında sürtünme ve yağlama gibi durumlara da direnç göstermesi gerekmektedir.

Öztürk ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada bu yöntemleri detaylıca anlatarak yöntemlerin doğruluk ve hassasiyetlerini belirlemişlerdir. Gridlerin yüksek doğrulukta ve çözünürlükte elde edilmesi ve yöntemin uygun maliyetli olması da önemlidir. Fotokimyasal yöntemle oluşturulan gridlerin ovalanarak bile çıkması, lazer ile oyma işleminin pahalı olması, elektrokimyasal dağlama yönteminde iyi toleranslar elde edilebilmesine rağmen özel ekipmana ve kimyasallara ihtiyaç duyulması ve çentik etkisi yapma ihtimalinden dolayı, bu çalışmada bu yöntemlerin kullanılması uygun bulunmamıştır. Bunun yerine, oluşturulan gridlerin şekil değişiminden etkilenmemesi, çentik etkisi oluşturmaması ve yöntemin uygulanışının basit oluşu nedeniyle gridleme için en uygun yöntem olarak Serigrafi yöntemi belirlenmiştir (Öztürk ve ark., 2009).

2.4.2. Şekillendirme

Nakajima ve ark. (1971) tarafından önerilen deneyde, farklı genişlikteki dikdörtgen veya dairesel numuneler iki kalıp arasına süzdürme çubukları ile kilitlenir.

Daha sonra 100 mm yarı küresel bir ıstampa ile hasar başlangıcına kadar şekillendirilmektedir. Farklı boyutlarda numune genişlikleri ve yağlayıcılar yardımıyla ŞSE'nin tamamı elde edilebilmektedir.

2.4.3. Gridlerin ölçülmesi

ŞSE'lerin oluşturulması için şekillendirme işleminden sonra hasar bölgesindeki gridlerdeki şekil değişiminin yani BŞD'lerin ölçülmesi gerekir. Sınır BŞD değerlerinin belirlenmesi için genellikle yırtılma veya boyunlaşma bölgesinden zıt iki bölgesinden ölçüm yapılabilmektedir. Gridlerin ölçülmesi işlemi manuel veya otomatik olarak gerçekleştirilebilir.

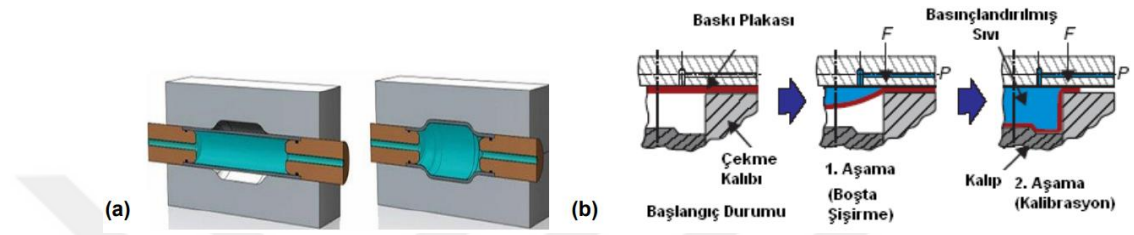
Manuel olarak skalalı mikroskop, ölçekli büyüteç, fotoğraf işleme metodu veya Mylar şeridi kullanılarak ölçme yapılabilir. Otomatik ölçmede ise gridlenen test numunesi şekillendirme esnasında kamera sistemi ile giritlerin şekil değişimi ölçülür. Manuel ölçüm yöntemlerinden olan fotoğraf işleme metodu Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Bu yöntemde gridlenen test numunesinin farklı açıdan fotoğrafları çekilerek görüntü işleme yöntemini kullanan ölçme yapılabilmektedir. Bu işlemleri aynı zamanda uzman kişinin zamanından tasarruf ederek, hızlı, güvenilir ve hassas olarak otomatik olarak yapabilen şekillendirme ile eş zamanlı ölçüm yapabilen sistemlerde vardır.



Şekil 2.6. Malzeme üzerindeki gridleri okuma sistemi

2.5. Değişken Yüklemeli Şekillendirme

Şekillendirme proseslerinde sac malzeme, sürekli artan bir kuvvet etkisiyle şekillendirilir. Şekil 2.7.'de gösterilen tüp ya da sac malzemelerin sıvı basıncı yardımıyla şekillendirildiği Hidro-Şekillendirme (HŞ) yönteminde homojen kalınlık dağılımı, şekillendirilebilirlikte ve parça kalitesinde artış, kalıp maliyetlerinde azalma avantajlarıyla, 1990'lardan bu yana özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Koç ve ark, 2002).



Şekil 2.7. (a) Tüp hidroşekillendirme, (b) Sac hidroşekillendirme. (Koç ve ark. 2002)

Sac HŞ'nin bir diğer çeşidi olan erkek kalıpla sac HŞ'de sac, karşı tarafındaki yüksek basınçlı akışkan yardımıyla erkek kalıbın şeklini almaktadır. Bu proseste Sınır Çekme Oranı (SÇO) 2,7 değerlerine kadar çıkmaktadır (Öztürk ve ark 2016), böylece klasik şekillendirmede 3-4 kademedede üretilebilecek parçalar tek kademedede üretilebilmektedir. Ancak bu yöntemde sıvı basıncının, erkek kalıbın konumuna göre anlık olarak kontrol edilmesi ve optimum yükleme profilinin belirlenmesi, prosesin en önemli zorluğudur. Dişi kalıpla sac HŞ yönteminde kalıp boşluğu ve sac arasında, yüksek basınçlı sıvı nedeniyle oluşan sürtünme, sacın akışını zorlaştırmakta ve erkek kalıpla sac HŞ'deki kadar derin parçalar üretilmesini engellemektedir. Fakat bu yöntemde sıvı basıncı için bir yükleme profiline ihtiyaç olmaması, ayrıca hareketli bir kalıbın da bulunmayışı prosesin uygulamasını oldukça basitleştirmektedir. Bu yöntemin kullanılmasında kalıp uyumu aranmadığı ve daha düşük kalitedeki kalıp malzemesi kullanılmasına imkân tanıdığı için kalıp masrafları %90'a varan oranda azalmaktadır (Zhang, 1999).

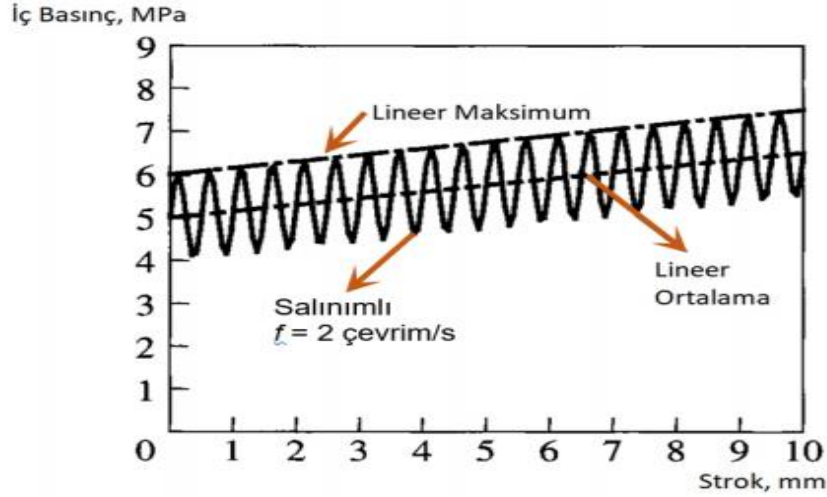
Hidroşekillendirme yöntemi ile 3-4 kademedede üretilebilecek bir parça, tek kademedede üretilebilmektedir. Bu durum ise için kalıp masraflarının yanında üretim masrafları da civarında azalmaktadır. Şekillendirilebilirlikte artış avantajı, homojen kalınlık dağılımı, parçaların daha ince sac ile üretilmesine ve sünekliği nispeten az

sayılabilecek hafif alaşımların, endüstriyel parçalara şekillendirilmesine olanak tanımaktadır.

Şekillendirilebilirlikte artış sağlayan HŞ'nin bu kabiliyetini daha da artırmak için yöntemin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu tür yöntemlere aday olan değişken yüklemeli Tüp Hidroşekillendirme (THŞ)'nin, çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum malzemelerde tüpün hacimsel genleşme oranını artırdığı ve daha üniform duvar kalınlıkları sağladığı literatürde kanıtlanmıştır (Mori ve ark., 2004, Yang ve ark., 2017).

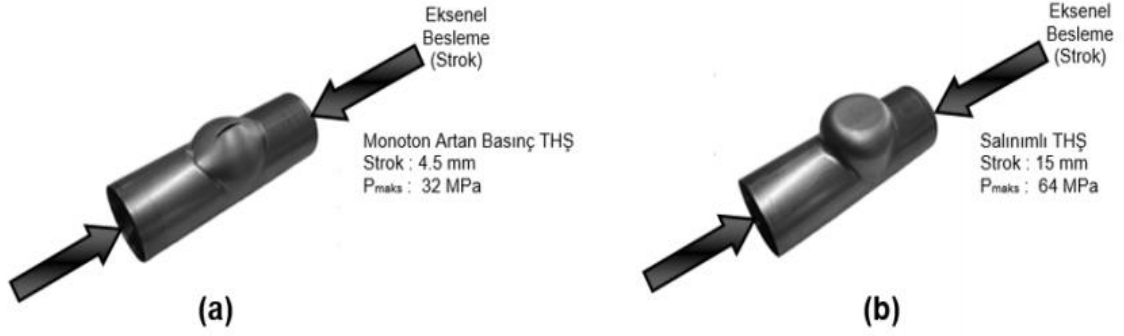
THŞ yönteminde şekillendirilebilirlik sınırının artırılması için, sıvı basıncının monoton artışı yerine salınımlı artışı olarak uygulanması fikri ilk olarak Mori vd. (2004) tarafından ortaya atılmıştır.

Bahsedilen çalışmalarda THŞ'de iç basıncın Şekil 2.8.'deki gibi salınımlı olarak uygulanmasıyla malzemede yırtılma ve burkulmanın engellendiği ve kalınlıktaki incelmenin azaldığı böylece malzemenin şekillendirilebilirliğin iyileştiği bulunmuştur.



Şekil 2.8. Salınımlı THŞ'de basınç profili (Mori ve ark. 2003)

Malzeme şekillendirilebilirliğinin düşük olduğu durumda, basıncın monoton olarak artırılmasıyla kalıp boşluğu tam olarak dolmadan Şekil 2.9.'da görüldüğü üzere yırtılma meydana gelmekteyken, basıncın salınımlı olarak uygulanması sonucu şekillendirilebilirlik artmış ve aynı parça başarıyla üretilebilmiştir. (Loh-Mousavi, 2008).

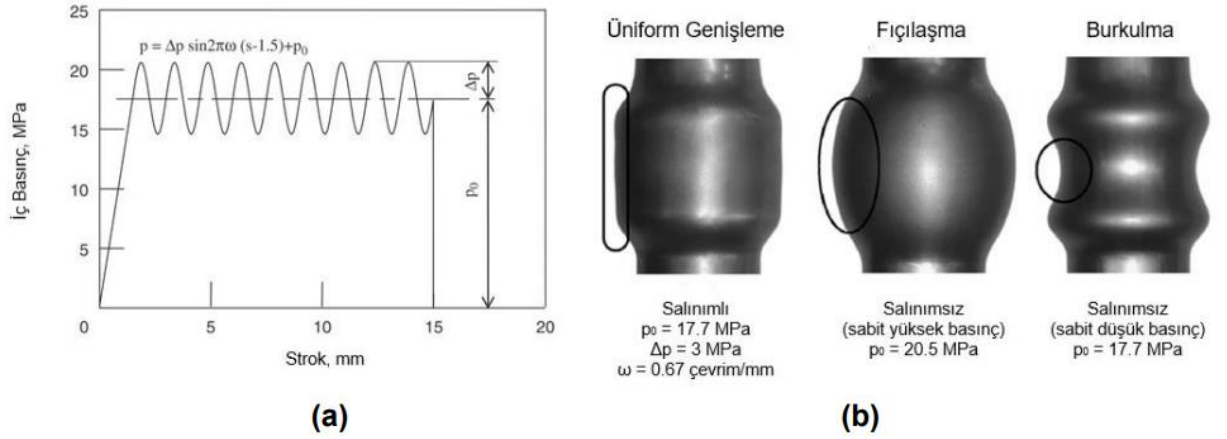


Şekil 2.9. (a) Monoton artan basınçlı, (b) Salınlımlı THŞ ile şekillendirme (Loh-Mousavi, 2007).

Değişken yüklemeli THŞ’de basınç uygulamasının şekillendirilebilirliği artırdığının bulunduğu çalışmalardan sonra genlik ve frekans gibi farklı salınım parametrelerinin prosese olan etkisi Mori ve ark. (2007) tarafından araştırılmıştır.

Söz konusu çalışma incelendiğinde tüp, kalıp içerisinde değilken serbest şişirilirken ortalama basınç (P_0) ve frekansın (ω) şekillendirme üzerine etkisi araştırılmıştır. Kullanılan malzeme ve boyutlar için Şekil 2.9.(a)’da görülen salınlımlı basınç profilinde $P_0=17.7$ MPa ortalama basınç, $\Delta P=3$ MPa genlik ve $\omega=0.67$ çevrim/mm frekans en uygun şekillendirmeyi sağlamıştır. Bu parametreler kullanılarak en iyi şekillendirme Şekil 2.9.(b)’de görüldüğü gibi üniform genişleme ile elde edilmiştir. Yüksek ve düşük sabit basınçta sırasıyla fıçılama ve burkulma meydana gelmiştir.

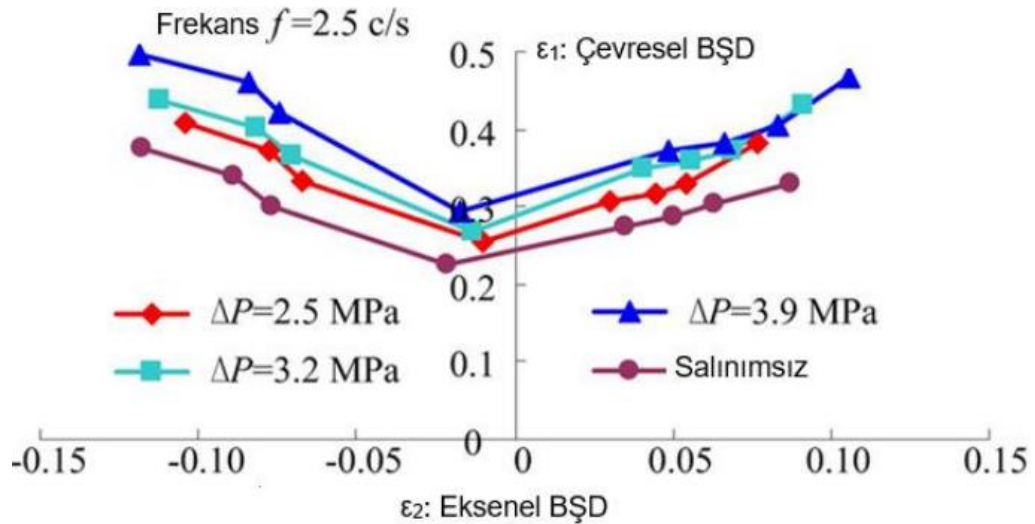
Proses parametrelerinin optimizasyonu ile salınımın olumlu etkisinin daha da artırılması mümkün olmaktadır (An ve ark., 2010). Taguchi deney tasarımı yöntemiyle THŞ’de şekillendirilen borunun et kalınlığında en etkili parametrenin frekans olduğu bulunmuştur (Ashrafi ve ark., 2015).



Şekil 9.(a) Serbest tüp şişirmede kullanılan basınç profili, (b) Basınç profilinin parçaya etkisi (Mori ve ark. 2007).

THŞ'deki salınım parametrelerinin SS304 malzemesinin şekillendirilebilirliğine etkisini inceleyen Yang ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada üç farklı genlik ve frekansın malzemenin ŞSE'ye üzerine etkisini araştırmıştır.

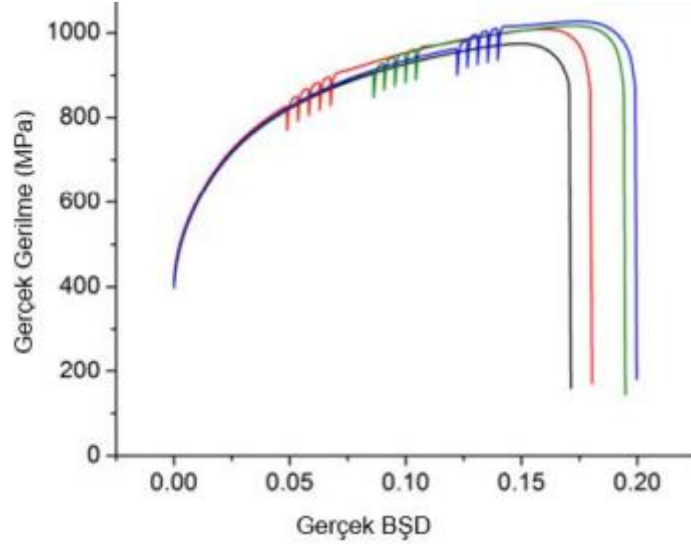
Şekil 2.10.'da görüleceği üzere THŞ prosesinde frekans ve genliğin artması ŞSE seviyesini önemli derecede yukarı kaydırmıştır.



Şekil 2.10. THŞ'de farklı genlik ve frekans parametrelerinin ŞSE'ye etkisi (Yang ve ark.2017)

Hariharan ve ark. (2013) tarafından yapılan çekme testi ile ilgili bir diğer çalışmada; süre, BŞD hızı ve salınımın uygulandığı BŞD değerinin gerilme gevşemesini etkilediği bulunmuştur. Malzeme mikroyapısı açısından dislokasyonlar incelenmiş, bu

olayın sebebi olarak; salınımlı deformasyon sırasında aynı kayma düzleminde hareket eden zıt işaretli dislokasyonların birbirlerini yok etmesiyle hareketli dislokasyon sayısının azalması ve zamana bağlı olarak meydana gelen toparlanma gösterilmiştir. BŞD ile dislokasyonların yok olmasının ilişkili olduğu, BŞD hızı ile de toparlanmanın ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 2.11. Gerilme gevşemesi (stress relaxation) testinde sünekliğin artışı (Çift Fazlı Çelik)

2.6. Literatür Analizi

. Saf alüminyumun hammadde olarak bol miktarda bulunması ve çinko, bakır, magnezyum gibi farklı elementleri ile alaşımlandırılarak mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Alüminyum alaşımları sahip olduğu hafiflik, iyi korozyon direnci ve nispeten özgül ağırlığına göre yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı endüstri sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bir mühendislik malzemelerinden birtanesidir.

Hidroşekillendirme, derin çekme vb. prosesler için malzemenin şekillendirme kabiliyetini en iyi temsil eden araç ŞSE'lerdir. ŞSE'leri belirlemek için yaygın olarak kullanılan testler Marciniak, Hecker ve Nakajima ve çekme testleridir. Ancak Marciniak testinde iş yükü daha fazladır. Bunun sebebi şekillendirme sınır diyagramının tüm bölgesini elde edebilmek için farklı boyutlarda iş parçaları ve ara elemanların hazırlanması gerekmektedir. Farklı iş parçaları ve ara elemanlar kullanmazsak sadece ŞSD'nin sağ tarafını elde edebiliriz. Hecker testinde ise şekillendirme sınır diyagramının sadece sağ tarafını elde edilebilmektedir. Çekme testinde ise ŞSD'nin sol

tarafı elde edilebilmektedir. Bu yüzden ŞSE'lerin belirlenmesinde genellikle Nakajima testi kullanılmaktadır.

Sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında uygulanan mekanik kuvvetin ve/veya basıncın değişken (salınımlı) olarak uygulanması yeni bir yöntem olarak sayılabilir. Bu konu ile ilgili literatür tarandığında değişken yüklemenin THŞ ve çekme testinde uygulandığı görülmektedir.

Yang ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada üç farklı genlik ve frekansın malzemenin ŞSE'e üzerine etkisini araştırmıştır. Şekil 2.10.'da görüleceği üzere frekans ve genliğin artması ŞSE seviyesini önemli derecede yukarı kaydırmıştır.

Değişken yükleme durumunda Nakajima testi ile ŞSE'lerin belirlenmesi çalışmasına rastlanmamıştır. Ancak THŞ yöntemi ile sınır BŞD'ler belirlenerek ŞSE'ler belirlenmiştir.

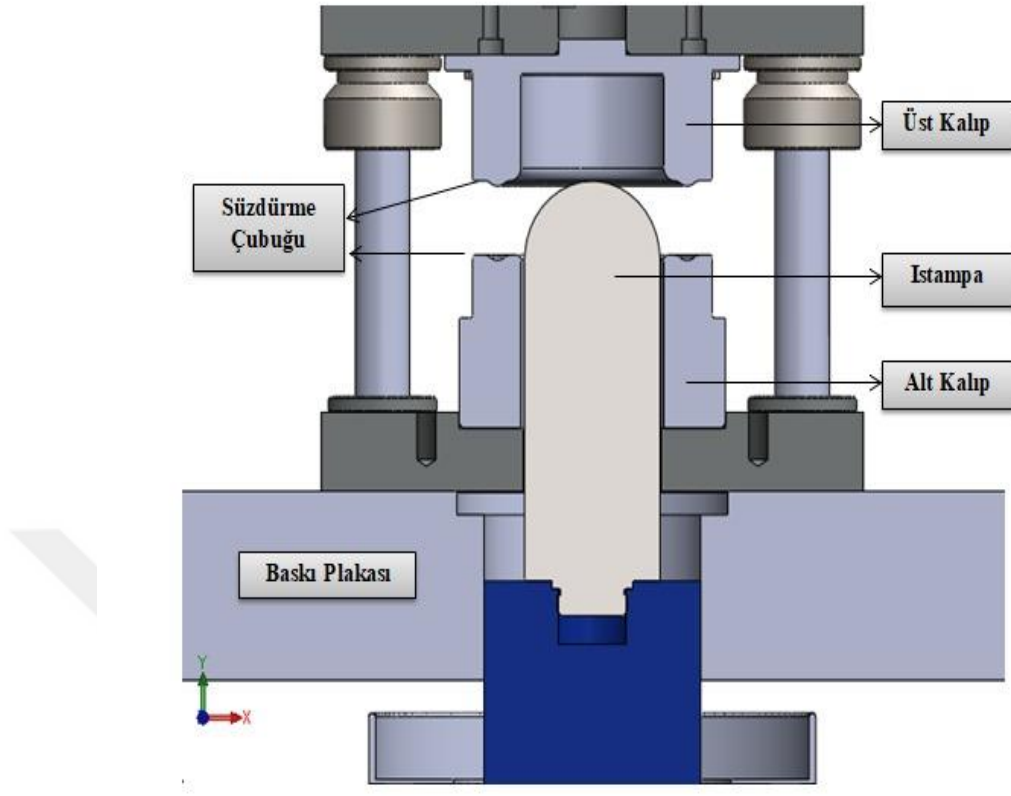
3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle Nakajima testi kalıpların tasarımından, numunelerin hazırlanmasından, 5754 alaşımlı alüminyum sac malzemelere uygulanan ısıtıl işleminden, testlerin yapılarak BŞD'lerin elde edilmesinden bahsedilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında monoton ve değişken yükleme durumunda ŞSE'lerin oluşturulması anlatılmıştır.

3.1. Nakajima Test Kalıplarının Tasarımı

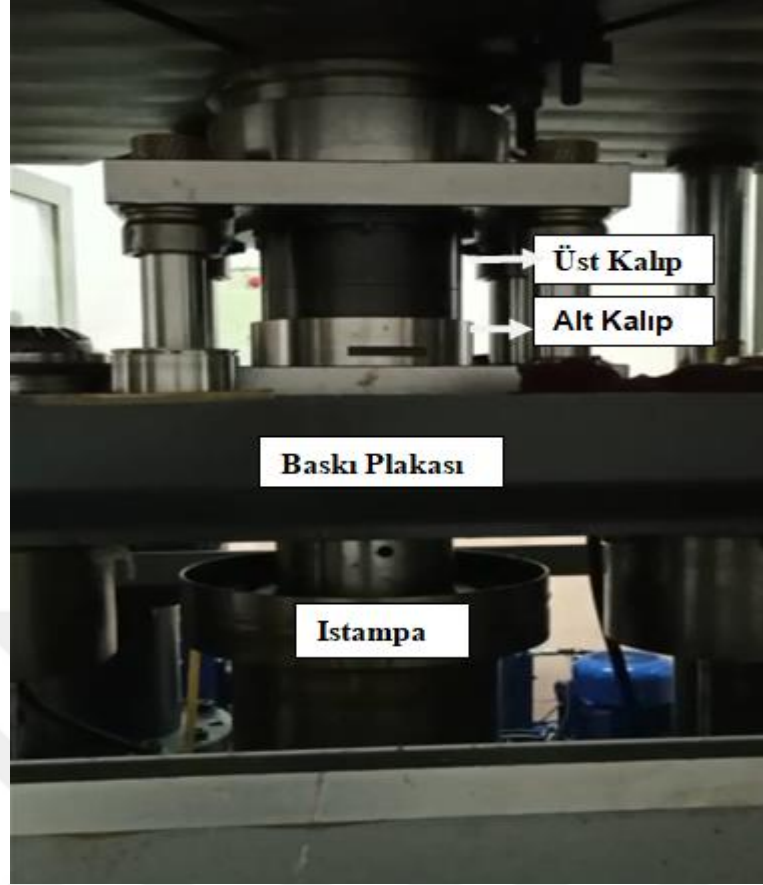
Nakajima ve Marciniak testleri ŞSE'lerin belirlenmesi için en çok kullanılan yöntemlerdendir. Marciniak testinde numune ve ara sac geometrilerinin üretiminin zor oluşu nedeniyle pratikte ŞSE'lerin belirlemek için genellikle Nakajima testi kullanılır. Bu nedenle Al5754 malzemesinin ŞSE'lerin belirlenmesi tez çalışmasında Nakajima testi kullanılmıştır. Nakajima testi ile şekillendirme sınır diyagramının tüm bölgelerini farklı genişlikte test numuneleri kullanılarak elde etme imkanı mevcuttur.

Testler Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan hidro-şekillendirme presinde yapılmıştır. Bu preste kapama kuvveti, ıstampa hareketi konum ve hızı test boyunca ölçülebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Boyun verme veya yırtılma sırasında hareket durdurulmaktadır. Nakajima testi Şekil 11'de görüldüğü gibi alt, üst kalıp ve ıstampa olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Tasarlanan kalıplar talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Kalıplar deforme olmaması için ısıtıl işlemle sertleştirilmiş ve hidro-şekillendirme presine monte edilmiştir. Nakajima test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.1.'de, kalıpların teknik resimleri de EK-1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Nakajima test düzeneğinin şematik gösterimi

Nakajima testlerinde sac numune alt ve üst kalıp arasına merkezlenerek yerleştirilir. Standartlarda şekillendirme sırasında sac ile ıstampa arasında ki sürtünmenin az olması istenmektedir. Bu nedenle sacın ıstampayla temas ettiği yüzeye parafin ve gres sürülmüştür. Bu işlemler yapıldıktan sonra sac, baskı plakası ve kalıplar arasında kilitlenmiştir. Sacın kilitlenmesi işlemi kalıplarda bulunan süzdürme çubukları ve baskı plakası kuvveti ile sağlanmaktadır. Baskı plakası kuvveti presin mevcut kapasitesine göre şekillendirme boyunca 60 ton uygulanmıştır. Bu sayede sacın alt ve üst kalıp arasındaki sacın akışı engellenmekte ve numune küresel bir ıstampa ile hasar durumu meydana gelinceye kadar gerdirilmiştir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Nakajima test kalıplarının hidroşekillendirme presine montaj halı

3.2. Numunelerin hazırlanması

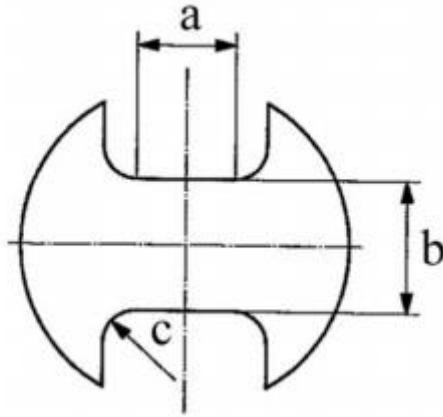
Bu çalışmada ŞSE'ler, düzlem dışı şekillendirme testlerinden olan, Nakajima yöntemi kullanılarak çizilmiştir. Test numunelerinin hazırlanması, şekillendirilmesi ve BŞD değerlerinin ölçülmesi aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

3.2.1. Numune Geometrilerinin Belirlenmesi

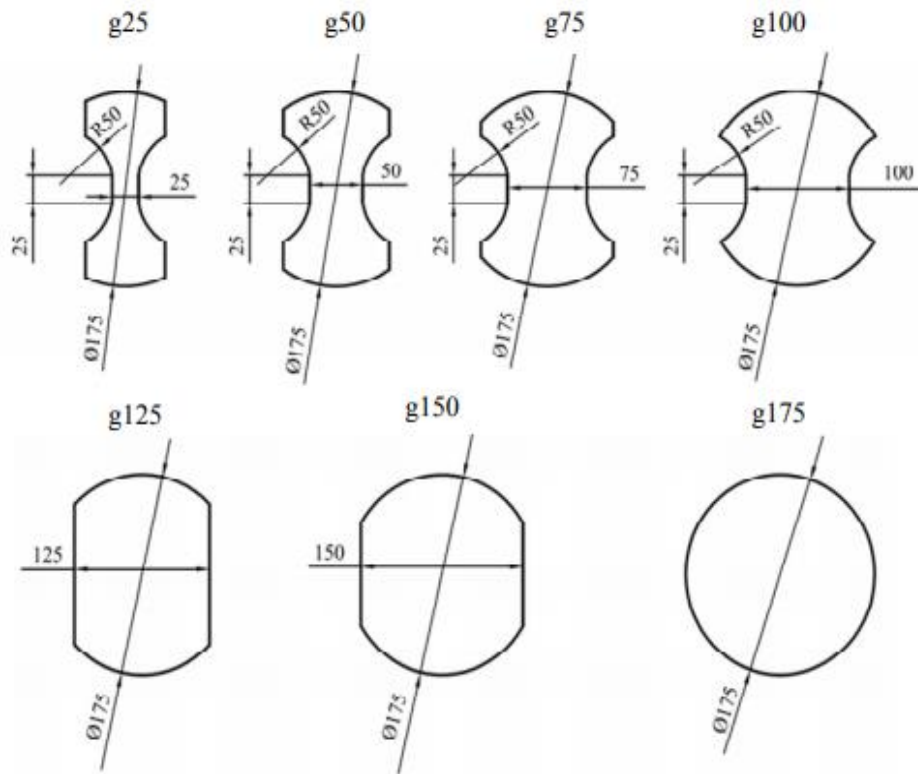
ŞSE'lerin test numunelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan iki standart vardır. İlk olarak ASTM 2218-02 (Ağustos 2002) standardına göre elde edilebilir. Ancak bu standartta Nakajima testi uygulaması ile ilgili birçok ayrıntı vardır. Bu ayrıntılar ise her bir araştırmacının farklı numune geometrileri, yağlayıcılar, hasarın başladığı nokta hakkında farklı kabuller yapmasıdır. Bu kabullerde farklı ŞSE'lerin oluşması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda standartta sınır BŞD değerlerinin belirlenmesi konusunda herhangi bir değerlendirme yöntemi belirtilmemiştir.

2008 yılında yayımlanan ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardında ilk standartta bahsettiğimiz belirsizlikleri ve farklı uygulama koşullarını ortadan kaldırarak ŞSE'lerin tekrarlanabilirliğini, yeniden üretilebilirliğini artırmıştır ve güvenilir ŞSE'ler elde edilmesini sağlamıştır.

ISO standardında belirtilen numunelerin gösterimi Şekil 3.3.'de ve Nakajima numune takımı Şekil 3.4.'de verilmiştir. Numune genişliği "b", 25, 50, 75, 100, 125, 150 ve 175 mm seçilmiştir. Bu numunelerin "a" ölçüsü standarda uygun olacak şekilde 25 mm olarak alınmıştır. ISO standardında ŞSE'nin hassas olarak belirlenebilmesi için şekillendirmenin hemen hemen sürtünmesiz olması ve tüm genişlikler için aynı çeşit yağlayıcı kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle deneylerde yağlayıcı düşük seviyede sürtünme katsayısına sahip katı parafin ve gres kullanılmıştır. Sac ile ıstampa arasında ki sürtünme kat sayısının sıfır olması ideal durumunda yırtığın kubbenin tam üstünde olması beklenir. Ancak standartta belirtildiği gibi başarılı bir şekillendirme için yırtığın kubbe tepe noktasından uzaklığı ıstampa çapının % 15'inden daha fazla olmaması gerekir.



Şekil 3.3. Nakajima numune geometrisi (ISO-12004-2)



Şekil 3.4. Nakajima test numunesi takımı (ISO-12004-2)

3.2.2. Isıl İşlem

Numuneler Şekil 14'deki gibi lazerle kestirilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan deformasyonla yarı sertleştirilmiş durumda olan Al 5754 malzemesi H22 temperi halinde satın alınmıştır. Daha sonra ısıtılma işlemi uygulanarak O temperine dönüştürülmüştür. Böylece deformasyonun etkisi giderilerek malzeme en yüksek sünekliğe sahip olacak duruma getirilmiştir.

Tavlama, rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen bir ısıtma işlemidir. Tavlama işlemi ile dislokasyon yoğunluğu en düşük seviyeye inmiş yeni kristaller meydana gelir. Tavlamanın başlangıcında aşırı şekil değiştirmiş bölgelerde yeni kristaller oluşur. Bunlar zamanla tüm malzemeyi kaplar. Haddelenmeden dolayı başlangıçta ince taneli olan yapı uzun süre tavlaniırsa tane büyümesi meydana gelir ve kaba taneli bir yapı oluşur.

Tavlama sıcaklığı metalin ergime sıcaklığına, uygulanan plastik deformasyonun miktarına ve tavlamanın süresine bağlıdır. Çalışmada Al 5754-H22 malzemesi 380°C’de ve 4 saat tavlandıktan sonra oda sıcaklığında havada soğutulmuştur. En

yüksek sünekliği sağlayan ve malzeme mukavemetini önemli ölçüde düşürmeyen değerler olduğu için bu parametreler seçilmiştir (Çetin 2005).

Test numuneleri standarda göre kestirildikten sonra ısıtma işlemleri Konya Teknik Üniversitesi Malzeme ve Kimya laboratuvarında bulunan Protherm marka kül fırınında yapılmıştır (Şekil 3.5.).

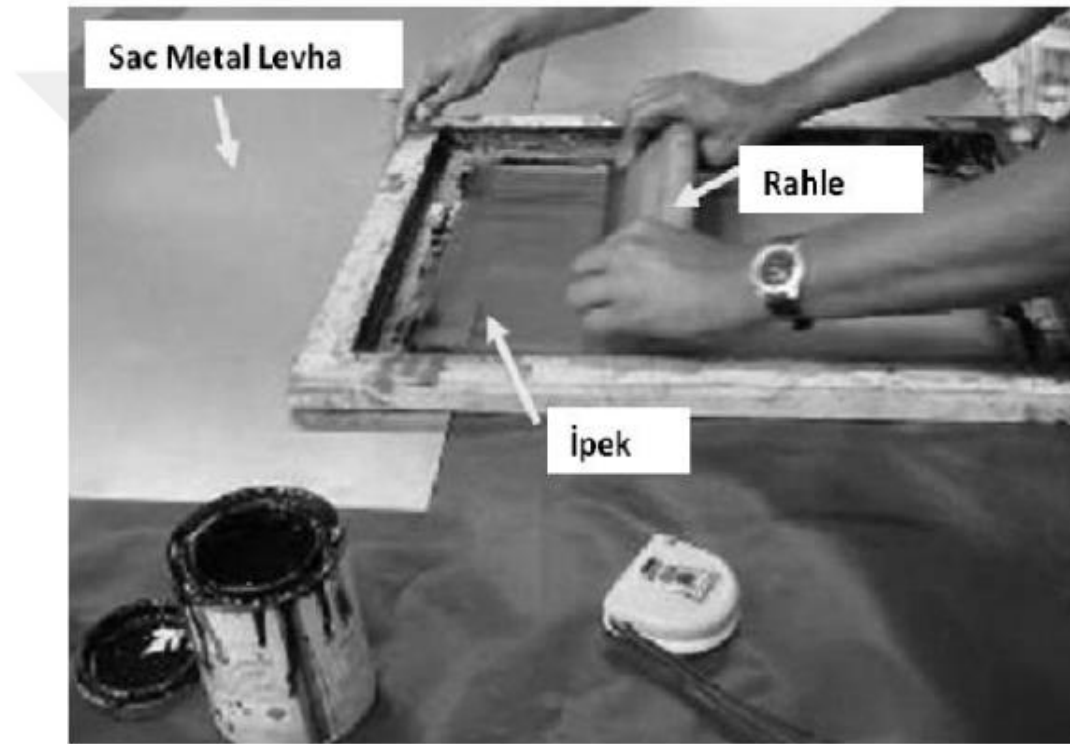


Şekil 15. Nakajima test numunelerinin kül fırınında ısıtılması

3.2.3. Numunelerin Gridlenmesi

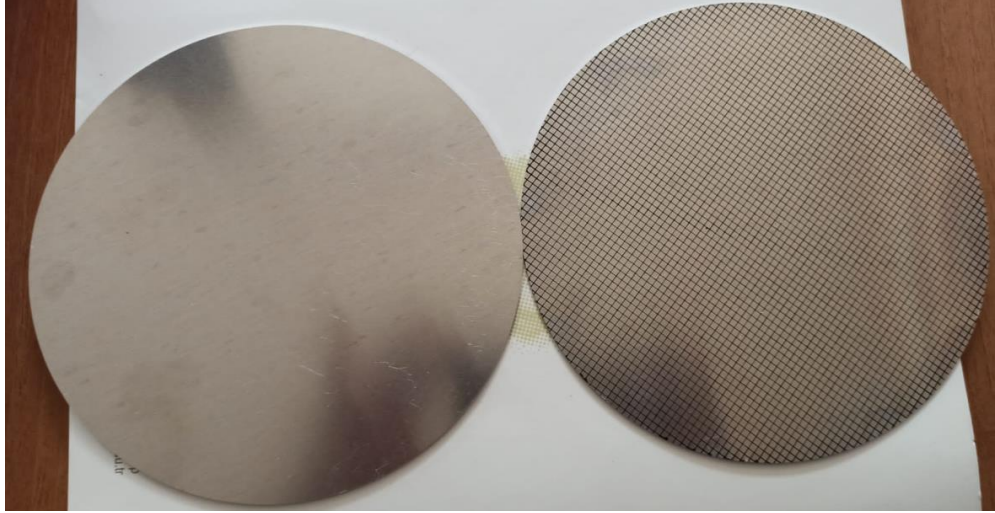
Şekillendirme işleminden yapılmadan önce, bir yüzeyine serigrafi yöntemi kullanılarak 2.5×2.5 mm boyutlarında kare gridler oluşturulmuştur. Serigrafi yöntemi, gridleme işlemi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi, ilk olarak bir metal veya ahşap çerçeve üzerine ipek gerilir. İpeğin üzerine ışıktan etkilenen bir foto emülsiyon sürüldükten sonra, malzemenin üzerine geçmesini istediğimiz aydınlar üzerine basılan şablon ipeğin üzerine yerleştirilir. Sonra emülsiyon ultraviyole ışığa maruz bırakılarak, ipek üzerinde grid çizgilerinin olduğu kısım dökülüp diğer kısımlar kalır. Ortaya çıkan serigrafi kalıbı çerçevelerinden, vakum yapılan baskı masasına monte edilir. Vakumla hava emilmesinin amacı, malzemeyi masaya sabitleştirmek ve kaymasını engellemektir. Son olarak gridlenecek numuneler üzerine yerleştirilen ipeğe kalıcı bir iz bırakan özel bir mürekkep dökülerek Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi rahle ile düzgün şekilde yayılır. Böylece ipek üzerindeki açık

kısımlardan geçen mürekkep numune üzerine gridleri oluşturur. Numuneler daha sonra fırında 60-70 °C sıcaklık'ta 20-30 dk süre aralığında bekletilerek oda sıcaklığında kurutmaya bırakılır. Bu işlemler sonucunda gridler herhangi bir kuvvet etkisi altında yüzeyden dökülmeden şekil değiştirmeye açık hale gelir. Aynı zamanda çevresel etkilere karşı dirençli hale getirilir. Şekil 3.6'da serigrafi yöntemi ile gridlenmiş örnek bir numune görülmektedir. Serigrafi yöntemi ile elde edilen gridlerin şekil değiştirme sonunda sacın yüzeyinden dökülmediği görülmüştür. Şekil değiştirme esnasında gridlerin dökülmesi yapılan işlemde boyanın numune yüzeyine iyi nüfus ettirilemediği anlamına gelmektedir. Bu durumda istenmeyen bir olaydır.



Şekil 3.6. Serigrafi yöntemi ile numuneler üzerinde gridlerin oluşturulması (Hariharan ve Balaji, 2009)

Şekillendirme sırasında çentik etkisini ortadan kaldırmak ve gridleme yapılırken ipek kumaşın yırtılmasını önlemek için numunelerin kenarları gridlenmeden önce zımparalanmıştır. Şekil 3.7.'de bir adet Nakajima test numunesinin bir yüzeyinin gridlenmeden önceki ve sonraki hali görülmektedir.

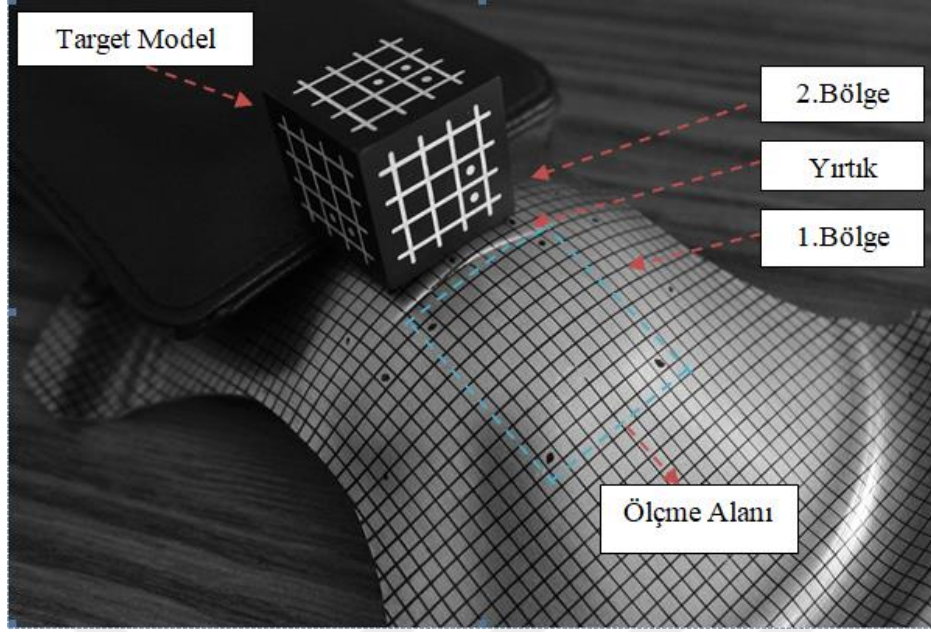


Şekil 3.7.. Serigrafi yöntemi ile test numunesinin bir yüzeyine kare gridlerin oluşturulması

3.2.4. Grid analiziyle BŞD ölçme yöntemi

Grid analizi yöntemi BŞD dağılımlarını ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde gridlendirilmiş test numunesi şekillendirildikten sonra gridlerin boyut değiştirmelerine göre BŞD bulunur. Şekillendirilen test numunesinin iki farklı açıdan profesyonel fotoğraf makinesi ile fotoğrafı çekilir. Daha sonra grid boyutlarındaki yüzde uzama ve kısaltmalar Asame yazılımı ile ölçülür. Bu yöntem aşağıda detaylıca anlatılacaktır.

Numune üzerindeki BŞD dağılımlarını elde etmek için bilgisayarlı grid analiz programı ASAME 4.1. yazılımı kullanılmıştır. Nakajima test numuneleri yırtığın (hasar) sağ ve solu olmak üzere iki için ölçme işlemi bölgeden oluşmaktadır. Her iki bölge için ilk olarak şekil değiştirmiş numuneler üzerinde en az 10×10 grid alanı kapsayacak şekilde ölçme yapılacak bölge işaretlenmiştir. İşaretlenen bölgenin yakınına referans küpü (target model) yerleştirilmiştir (Şekil 3.8.).

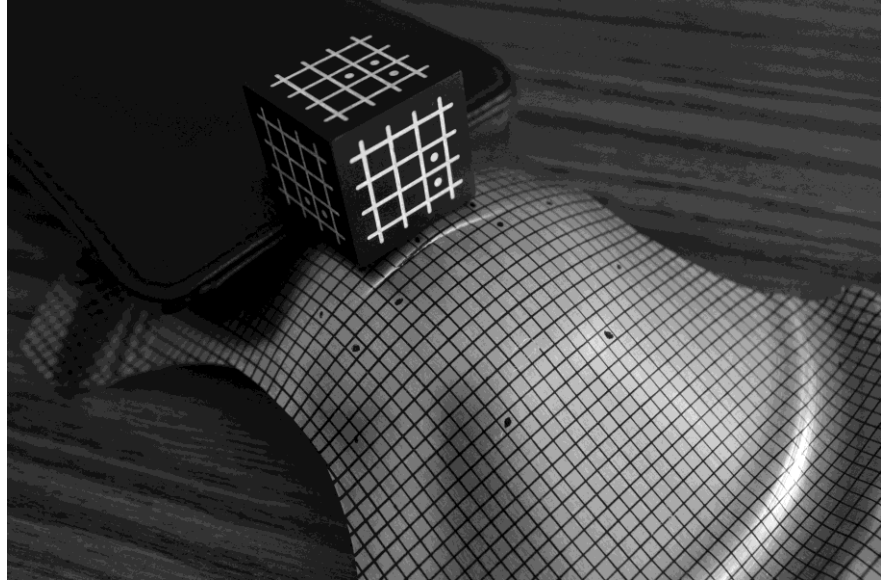


Şekil 3.8. Target modelin yerleştirilmesi ve ölçme alanının belirlenmesi

Türköz ve ark. (2009) çalışmalarında, fotoğrafları çekerken kullanılan kameranın ve fotoğrafların çekildiği ortamın grid analiz yöntemi ile ölçmedeki tekrarlanabilirliğe önemli ölçüde etki ettiğini belirtmektedir. Bu çalışmalarda, floresan ışığında çekilen fotoğraflardan BŞD'lerin tekrarlanabilirliği 0.0224 BŞD olarak belirlerken, gün ışığının homojen şekilde yayıldığı bir ortamda 0.0062 BŞD olarak elde edilmiştir. Bu nedenle fotoğraflar gün ışığının yumuşak geldiği, titreşimlerden uzak bir ortamda ve aynı şartlarda çekilmiştir.

Ölçmelerin doğru ve hassas yapılabilmesi için fotoğraf çekerken aşağıda hususlara da dikkat edilmiştir.

- 15 ve 25 mm boyutlarında referans küpleri vardır. Bu çalışmada 25 mm'lik referans küpü kullanılmıştır
- Her bir açıdan çekilen fotoğraflar ölçme alanının kapsamalıdır. Bir bölge için çekilen iki açıdan fotoğrafta target modelin en az bir yüzeyi ortak olmalıdır (Şekil 3.9.).



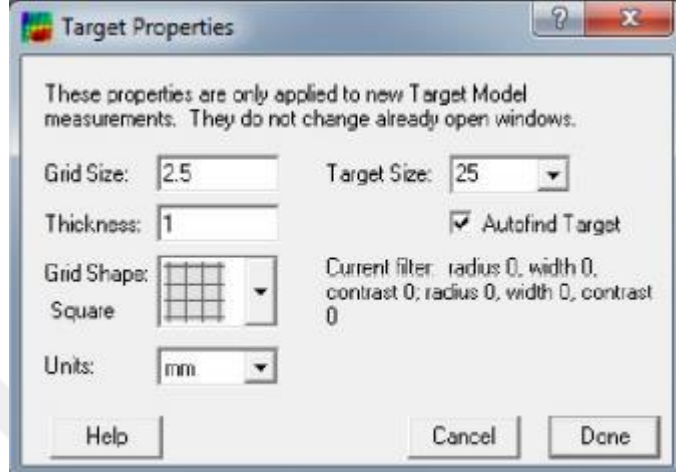
Şekil 3.9. Ölçme alanının bir bölgesinin bir açıdan çekilen fotoğrafı

- Fotoğraflar profesyonel fotoğraf kamerası ile çekilmelidir. Fotoğraf makine tripot kullanılarak sabitlenmelidir. Fotoğraf çekim esnasında tripot, target model ve test numunesi hareket ettirilmemelidir.
- Ölçme alanı ve referans küpünün fotoğrafı mümkün olduğunca kaplamasına dikkat edilmiştir.

Fotoğraflar ASAME 4.1. programı kullanılarak işlenmiştir. Farklı açılardan çekilmiş fotoğraflar ile majör ve minör BŞD'ler yazılım tarafından hesaplanır ve BŞD dağılımı elde edilir.. Fotoğrafların işlenmesi için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Ayarlamaların yapılması

ASAME’de “Referans Küpü Özellikleri” (Target properties) kutusuna seçilen referans küpünün boyutu girilir. Bu çalışmada 25 mm’lik referans küp kullanılmıştır. Ardından gridin boyutu, gridin şekli ve sac kalınlığı bilgileri girilir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Referans küpünün özellikleri “target properties” diyalog kutusundan girilmesi

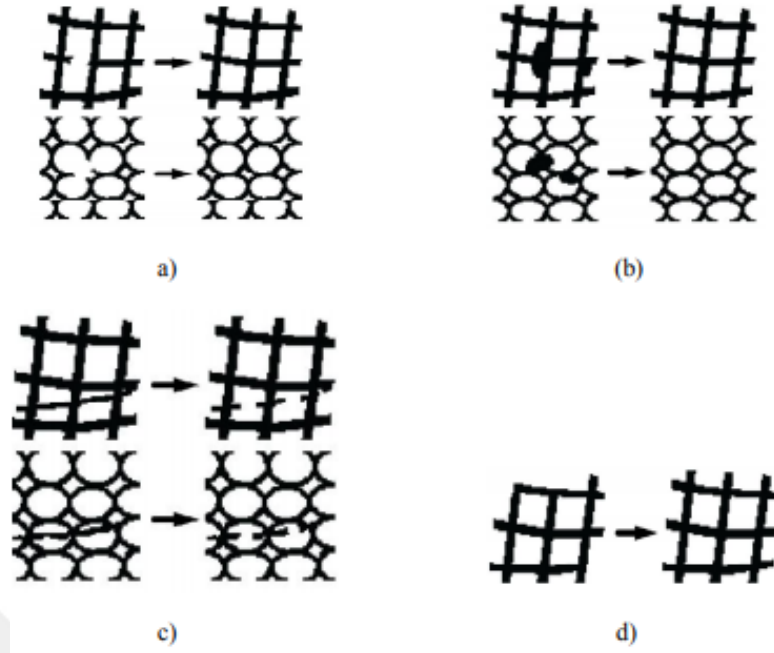
Test numunesinde ölçülecek olan bölgenin iki fotoğrafları açılır. Sonra Select komutu ile referans küpünü içerecek şekilde seçim yapılır ve “Measure” menüsündeki “Autofind” komutu ile referans küpü tanımlanır. 2. Ölçme alanının seçilmesi Select komutu ile daha önce numune üzerinde işaretlenen alan işaretlenir ve Trim komutu ile sadece ilgilenilen bu alanın kalması sağlanır.

2. Ölçme alanının seçilmesi

Select komutu ile daha önce numune üzerinde işaretlenen ölçüm alanı seçilir ve Trim komutu ile sadece ilgilenilen bu alanın kalması sağlanır.

3. Grid çizgilerinin düzenlenmesi

Bir ızgara yapısının oluşabilmesi için grid çizgilerinin kesintisiz olması gerekir. Varsa grid yapısındaki kesikli kısımlar tamamlanır (Şekil 3.11a.), normal grid çizgisinden kalın kısımlar varsa temizlenir (Şekil 3.11b.). Grid çizgisi haricindeki kapalı çizgiler kırılır (Şekil 3.11c.) ve grid yapısının dış kısımlarında kesişim noktalarında uzantı olmayan grid çizgileri uzatılır (Şekil 3.11d.).

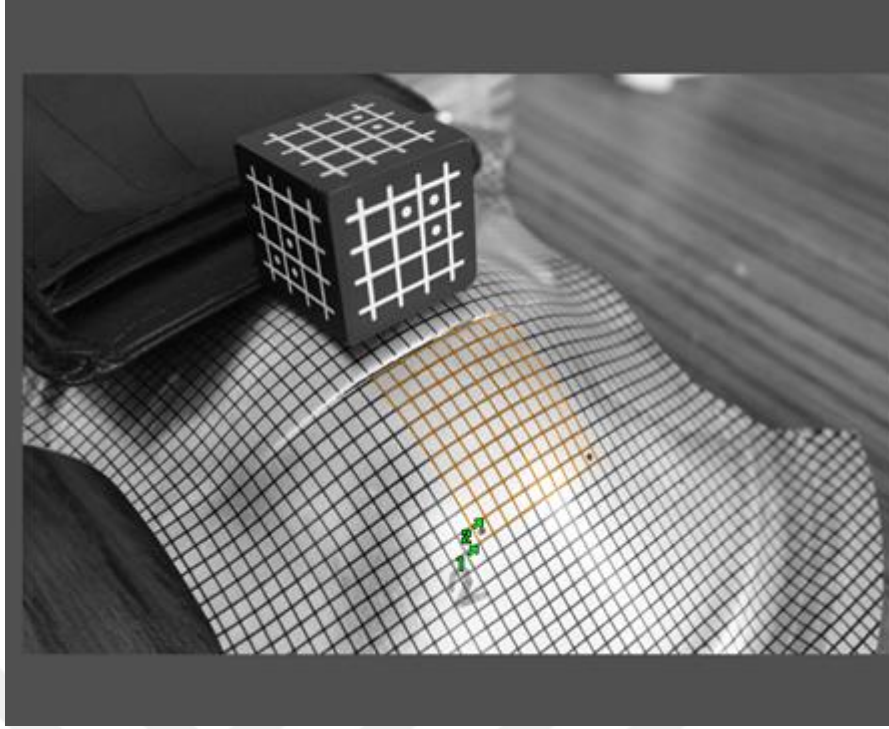


Şekil 3.11. Grid çizgilerinin düzenlenmesi (a) kesikli çizgilerin birleştirilmesi, (b) kalın bölgelerin temizlenmesi, (c) kapalı çizgilerin kırılması, (d) grid çizgilerinin uzatılması

Clean komutu ile grid çizgilerinin haricindeki çizgiler ve fazlalıklar temizlenir. Thin komutu ile grid çizgilerinin kalınlıkları inceltilerek bir piksele düşürülür. Halen fazlalıklar veya eksikler varsa giderilmelidir.

4. Izgaralama İşlemi

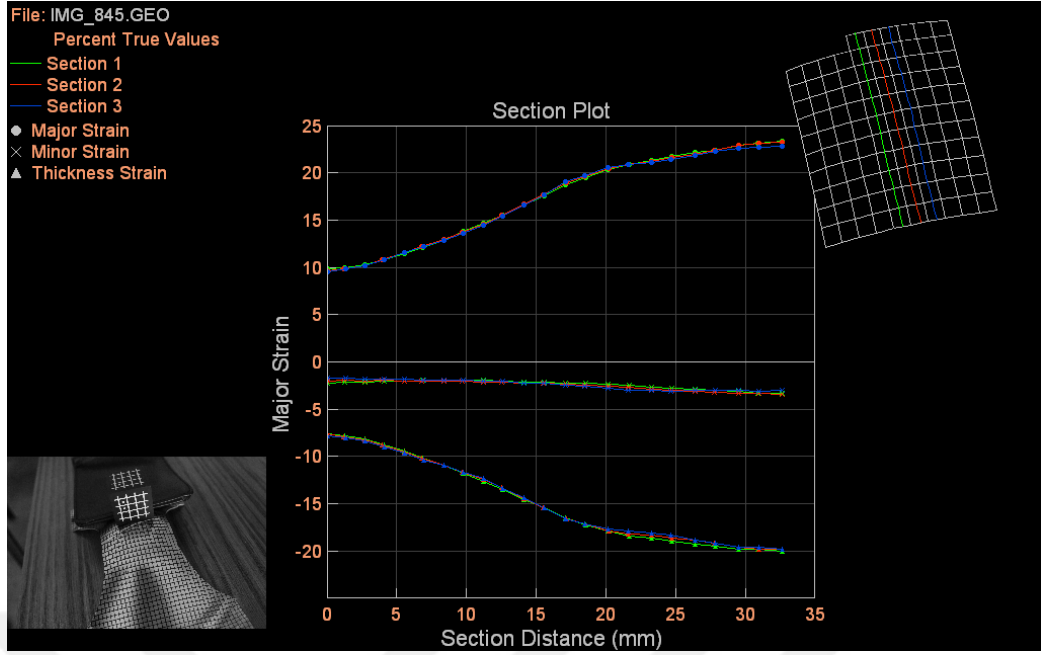
“Map Grid” komutu ile düzenlenmiş gridlerden Şekil 3.12’de görüldüğü gibi bir ızgara yapısı oluşturulur. Bu işlem kare gridlerde kesişim noktalarının, daire gridlerde ise daire merkezlerinin birleştirilmesiyle oluşturulur. Fotoğraf çekilmeden önce işaretlenen ölçüm alanı alınmıştır.



Şekil 3.12. Grid analiz programında oluşturulan tipik bir ızgara yapısı

5.Ölçmenin tamamlanması

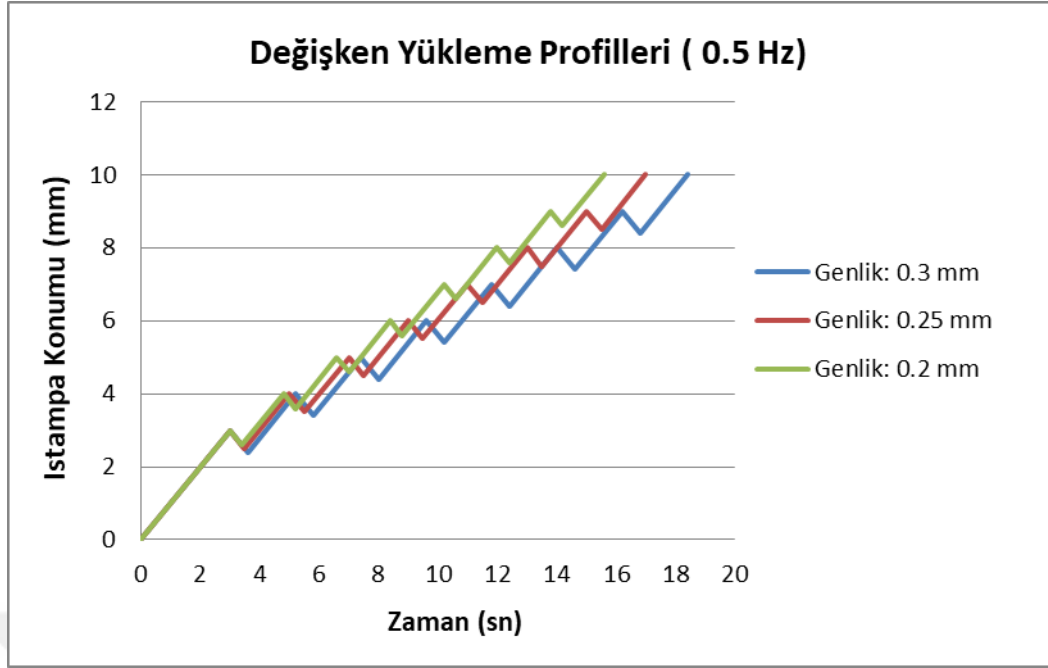
Test numunesi, yırtığın sağ ve solu olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. Her bir bölgenin iki farklı çekim açısından fotoğrafları işlendikten sonra, Measure komutu seçilerek her bir fotoğrafta ölçme alanının aynı noktası seçilir. Böylece iki boyutlu koordinatlardan üç boyutlu koordinatlar hesaplanır ve böylece ölçme alanındaki BŞD dağılımı belirlenir (Şekil 3.13.). Numunelerdeki BŞD dağılımları belirlendikten sonra, ŞSE'lerin oluşturulabilmesi için elde edilen 3 tane BŞD dağılımı Asame algoritmasında hesaplatılarak sınır BŞD'ler elde edilir.



Şekil 3.13. Asame programı ile ölçülen BSD dağılımı

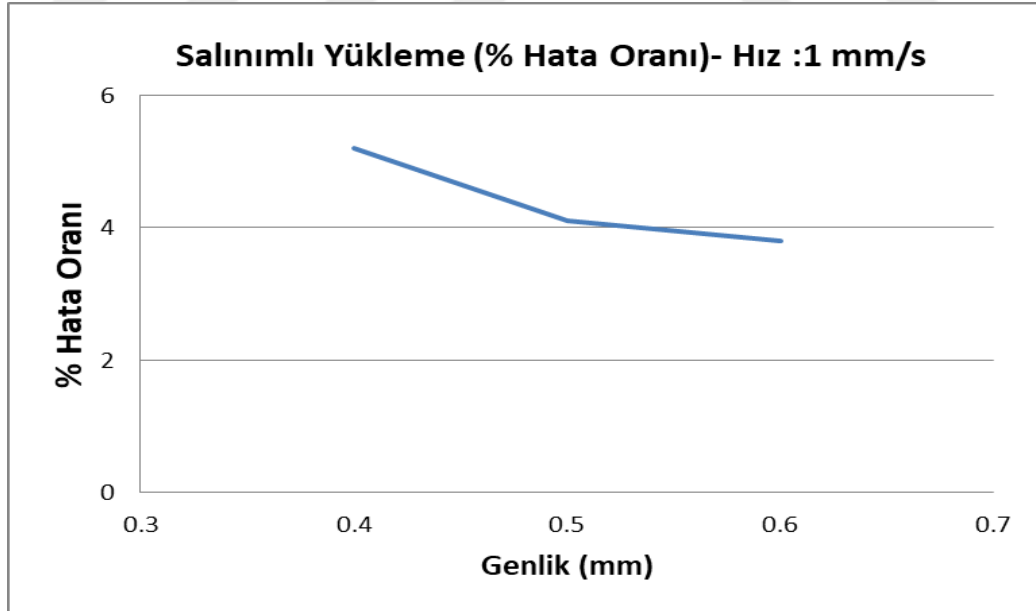
3.4. Test Ünitesi Kontrol Yazılımında Değişken Yükleme Modifikasyonu

Daha önceki çalışmalarda Nakajima testinde ıstampa sabit bir hızda ilerletilerek ölçmeler yapılmıştır. Bu çalışmada ise değişken yükleme durumu incelenmiştir. Bu nedenle ıstampa hareketinin sabit olması hali “monoton yükleme” olarak adlandırılmıştır. “Değişken yükleme” durumunda ise ıstampa yukarıya doğru hareket ederken bir miktar geri çekilmesi gerekir. Bu ilerleme ve geri çekmeler HNC kontrol sisteminde yazılıma belirli zamanlarda (frekans) ve miktarlarda (periyot) ileri ve geri konumları girilerek elde edilmektedir. Şekil 3.14’de 1 mm/sn hızda ve 0.5 Hz’de farklı genliklerde yükleme profilleri girilerek hidroşekillendirme presinin değişken yükleme durumu test edilmiştir.



Şekil 3.14. Farklı genliklerde ıstampanın 1 mm/s hızında değişken yükleme profilleri

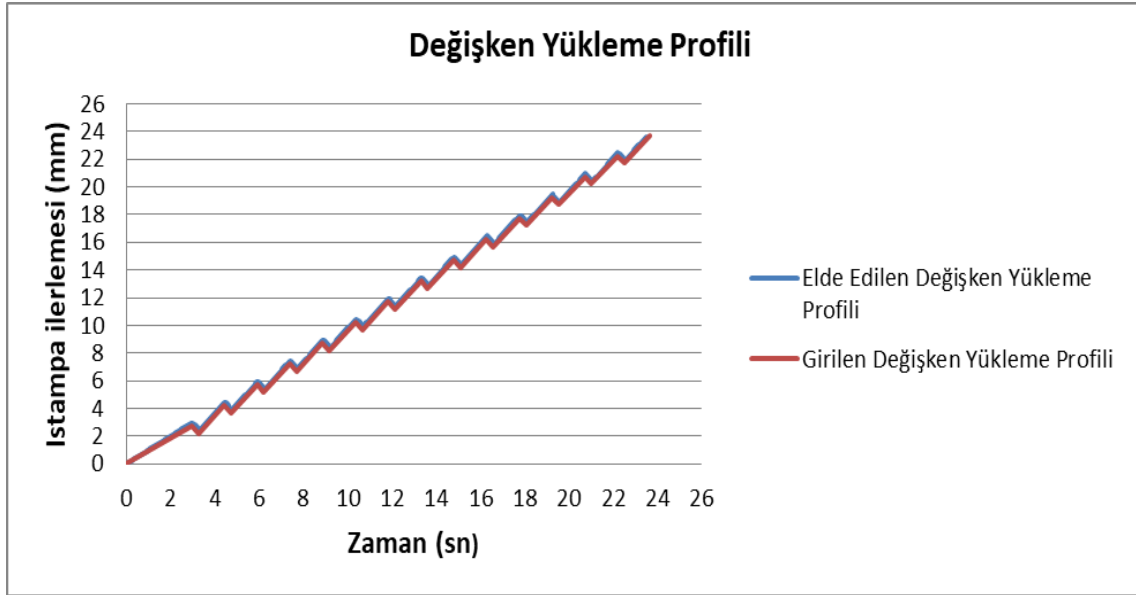
Bu yükleme profilleri hidroşekillendirme presinin kontrol ünitesine girilerek eğriyi elde etme yüzde hata oranı hesaplanmıştır. Yükleme profillerinde 7 kere ıstampa geri çekilmiştir. Her geri çekilmede bir hata oranı oluşmuştur. 1 mm /s hız için 7 geri çekilmenin ortalama hata oranı % 4.36'dır (Şekil 3.15).



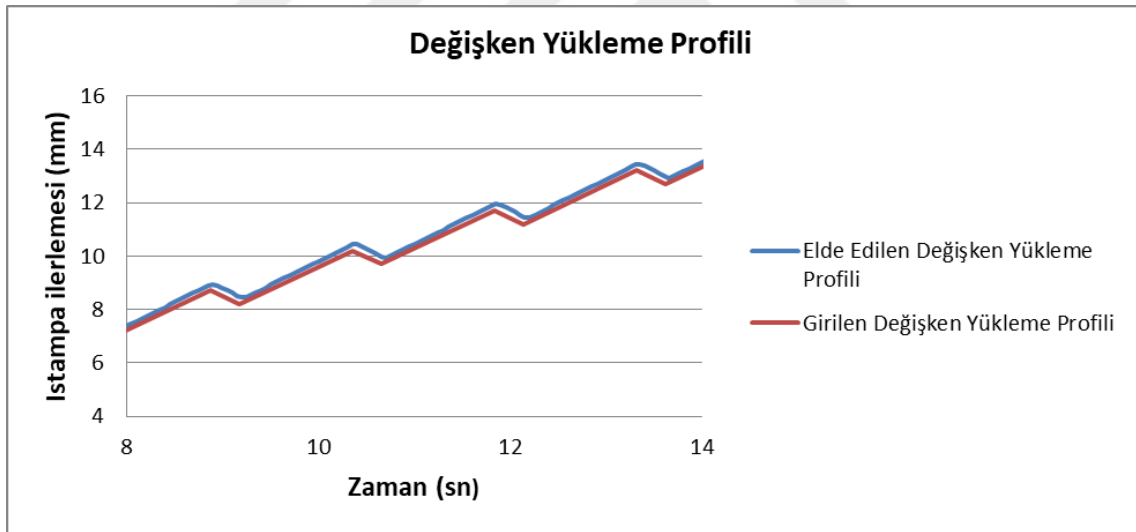
Şekil 3.15. Farklı hızlarda değişken yüklemede % hata oranı

Bu hata oranının oluşmasının sebebi hidroşekillendirme presinde oluşan bir takım mekanik sürtünmeler ve ıstampayı harekete geçiren hidrolik basınç silindirlerinin tepki

veriminden kaynaklanmaktadır. Girilen ve elde edilen değişken yükleme profili ortalama %5.32 hata oranı ile edilmiştir (Şekil 3.16-3.17).



Şekil 3.16. Girilen ve elde edilen değişken yükleme profili



Şekil 3.17. Girilen ve elde edilen değişken yükleme profili (8-14 sn)

3.5. Değişken Yükleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Değişken yükleme şartlarında istampa belirli konumlarda bir miktar geri çekilir ve tekrar ilerlemesine devam eder. Bu hareket çeşidi değişken yükleme olarak adlandırılır. İlerleme ve geri çekilme durumu belli bir genlik ve frekansta gerçekleşmektedir. Istampaya uygulanacak olan değişken yüklemedeki optimum genlik ve frekans Taguchi metodu ile belirlenmiştir. Genlik, frekans ve numune çeşidi kontrol

edilebilen faktörlerdendir. Kontrol faktörleri olan genlik, frekans, numune çeşidinin seviyeleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
Genlik	0.05 mm	0.15 mm	0.25 mm
Frekans	0.34 Hz	0.68 Hz	1.02 Hz
Numune Çeşidi	G50	G100	G150

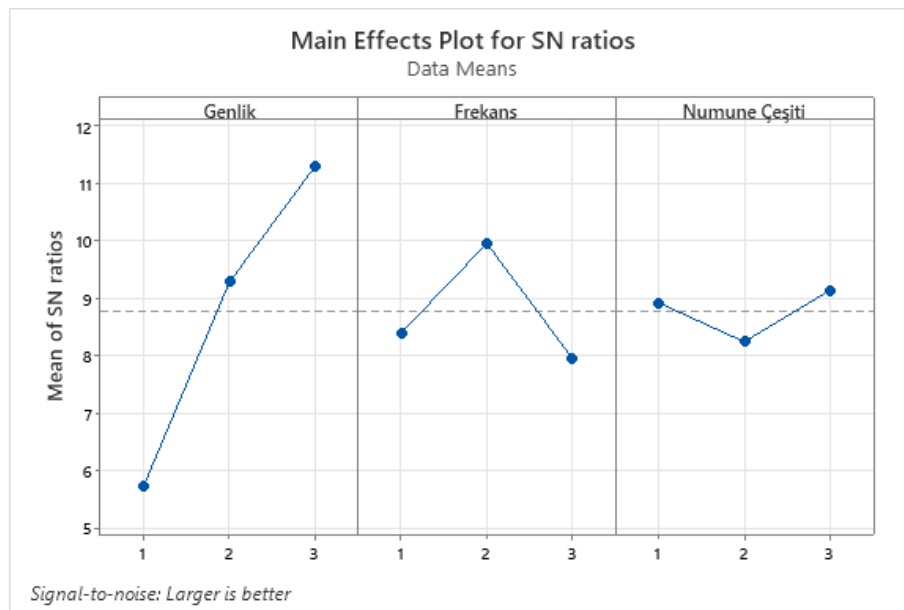
Üç seviyeli bir üç faktör için serbestlik derecesinin iki olması dolayısı ile seçilecek tasarım altı serbestlik derecesinden yüksek olmalıdır. Bu açıdan da değerlendirildiğinde çalışma için uygun tasarım olarak dokuz deneyli Taguchi L9 dik düzeyi karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden probleme uygun ortogonal dizi seçimi olarak L9 ortogonal deney tasarım matrisi seçilmiştir (Tablo 3.2.). Üç farklı frekans ve genlik kullanılarak genişlikleri farklı üç çeşit Nakajima test numunesi şekillendirilmiştir. Şişme yükseklikleri ölçülmüştür. Değişken yüklemede elde edilen şekillendirme yüksekliği monoton yüklemede elde edilen yükseklik ile kıyaslanmıştır. Yükseklikler arasındaki fark %iyileşme çıktı yani sonuç olarak verilmiştir.

Deney Numarası	Genlik	Frekans	Numune Çeşidi	İyileşme (%)
1	1	1	1	1.74
2	1	2	2	2.1
3	1	3	3	1.97
4	2	1	1	2.82

5	2	2	2	3.22
6	2	3	3	2.72
7	3	1	1	3.71
8	3	2	2	4.61
9	3	3	3	2.91

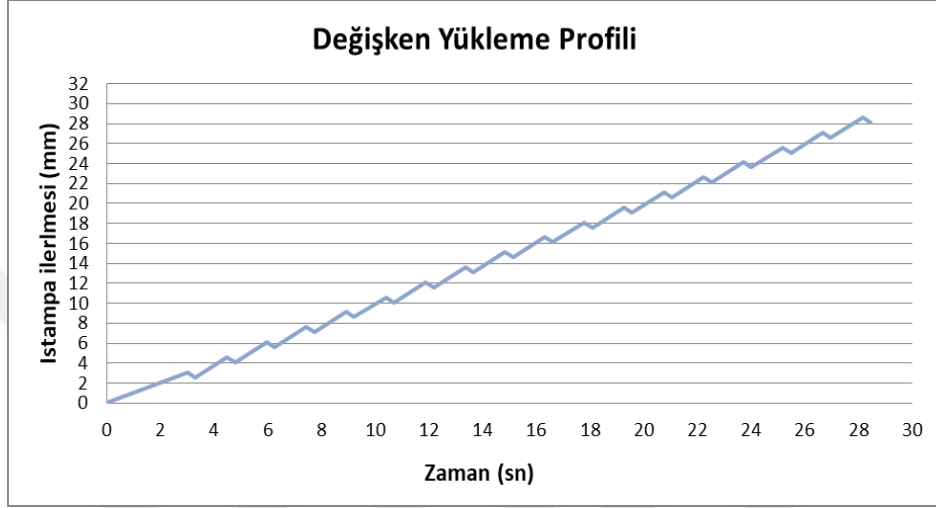
Tablo 3.2. Taguchi L9 seviye ve parametreler (Nakajima Test)

Taguchi deney tasarım metodunun analizinde Minitab 16 programı kullanılmıştır. Deney tasarımından faydalanarak elde edilen S/N oranları tüm faktör seviyeleri için Şekil 3.18. 'de verilmiştir. Parametrelerin optimum seviyeleri her zaman için S/N oranının en büyük olduğu durumda gerçekleşmektedir. Bu tasarım da amaç değişken yükleme sonucu şekillendirilen geometrinin şişme yüksekliği olarak monoton yüklemeye göre daha yüksek elde etmektir. Bu amaçtan yola çıkarak “en büyük en iyidir (larger is better)” yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 3.18. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi; genlik parametresinin üçüncü seviyesi olan 0,25 mm (3) , frekans parametresinin ikinci seviyesi olan 0,68 Hz (2) ve numune çeşidinin üçüncü seviyesi olan G150 (3) değerleri bu deney tasarımı için optimum tasarım parametreleri olduğu görülmüştür. Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ile yapılan deney sonucu iyileşme %4.74 bulunmuştur. Optimum parametreler sonucu elde edilen değişken yükleme profili Şekil 3.19’da verilmiştir.



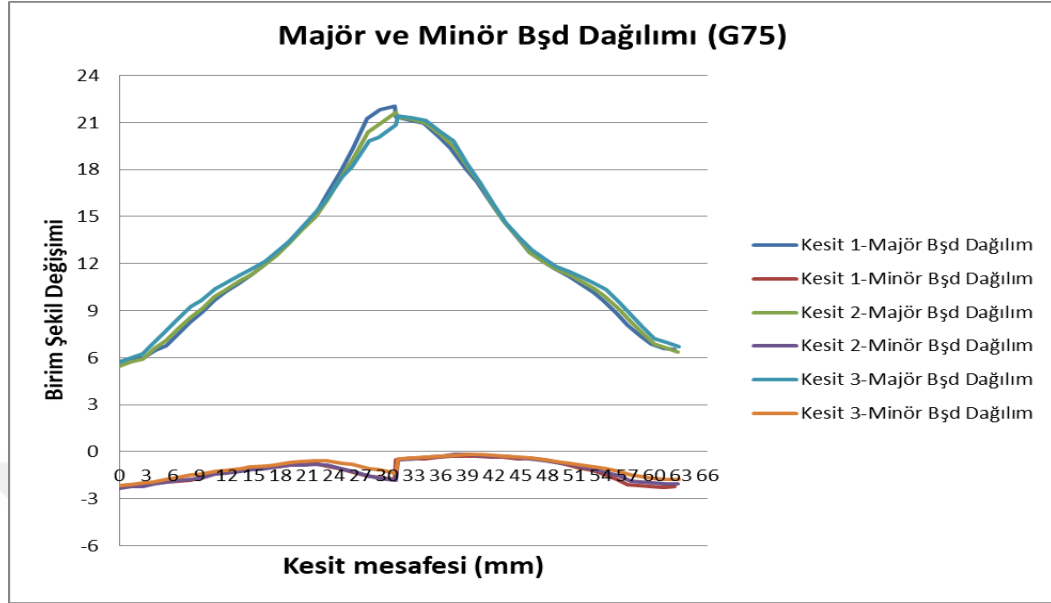
Şekil 3.19. (Genlik: 0,25 mm / Frekans 0,68 Hz) değişken yüklemeli ıstampa ilerlemesi

Girdi parametrelerinin çıkan sonuca etkisini nicel olarak belirlemek için ANOVA analizi yapılmıştır. Bu sayede sistem optimizasyonu için hangi girdi değişkeninin daha önemli ve etkili olduğu tespit edilmiştir. ANAVO analizi sonucu elde edilen R-Sq değeri test setinin başarısı için ana kriterdir. Giriş parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini açıklama yeteneği, R-Sq değerinin yüksekliğine bağlıdır. R-Sq değerinin 70 değerinden yüksek olması demek deneysel anlamlılık için yeterli olduğu söylenebilir. ANOVA analizi araştırma ve sonuç bölümünde anlatılmıştır.

3.6.Sınır BŞD’lerin Hesaplanması

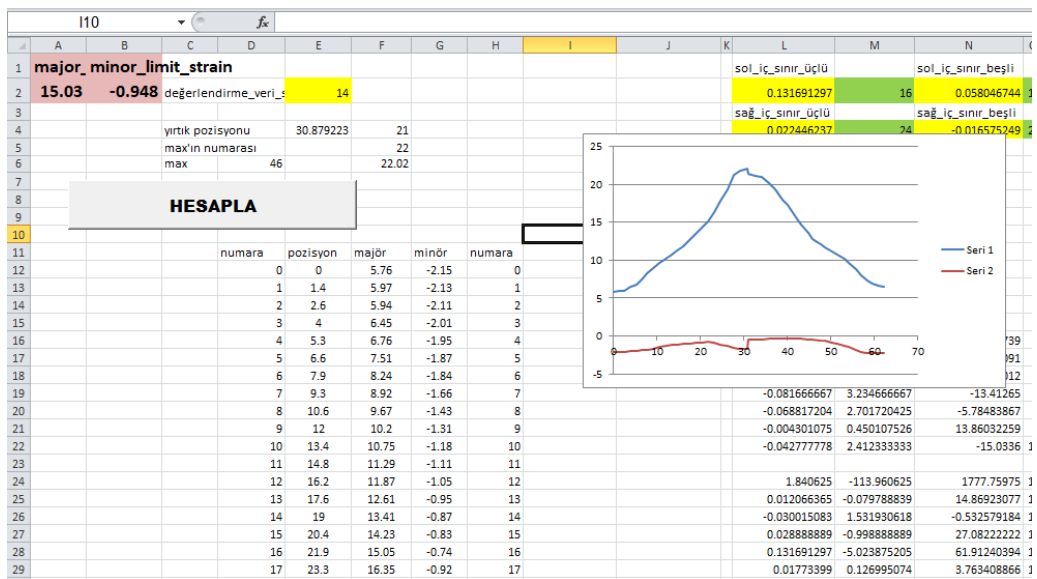
Asame 4.1 yazılımında her bir test numunesinden her bir bölge için en az 30 mm uzunluğunda üç tane ortaganel kesit geçirilmiştir. Kesit boyunca majör ve minör BŞD dağılımları elde edilmiştir (Şekil 3.21.). ISO-12004-2 standardına göre numunenin boyunlaşma veya yırtık bölgesine dik çizilen bu ortogonal kesitlerinden majör ve minör

BŞD'lerinden 1. ve 2. türevleri alınır. Elde edilen noktalardan çizilen parabolün tepe noktası sınır BŞD değeri olarak belirlenir.



Şekil 3.21. G75 test numunesinin kesit boyunca majör ve minör bşd dağılımları

Sınır BŞD'leri bulma işlem adımları excel programı üzerine yazılan algoritma tarafından otomatik olarak yapılmıştır. Bu yazılım Dilmeç M., (2014) tarafından yapılmıştır. Bu tez kapsamında bu yazılım yönteminden yararlanılmıştır. Bu sayede ISO-120004-2 standardına göre sınır majör ve minör BŞD değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Her bir test numunesinin majör ve minör bşd dağılımlarının algortmada hesaplatılması

Her iki yükleme durumu için her bir test numunesinin sınır BŞD'leri program üzerinden hesaplatılmış ve ŞSE'ler oluşturulmuştur. Araştırma ve sonuç bölümünde ŞSE'ler şekillendirilebilirlik açısından kıyaslanmıştır.

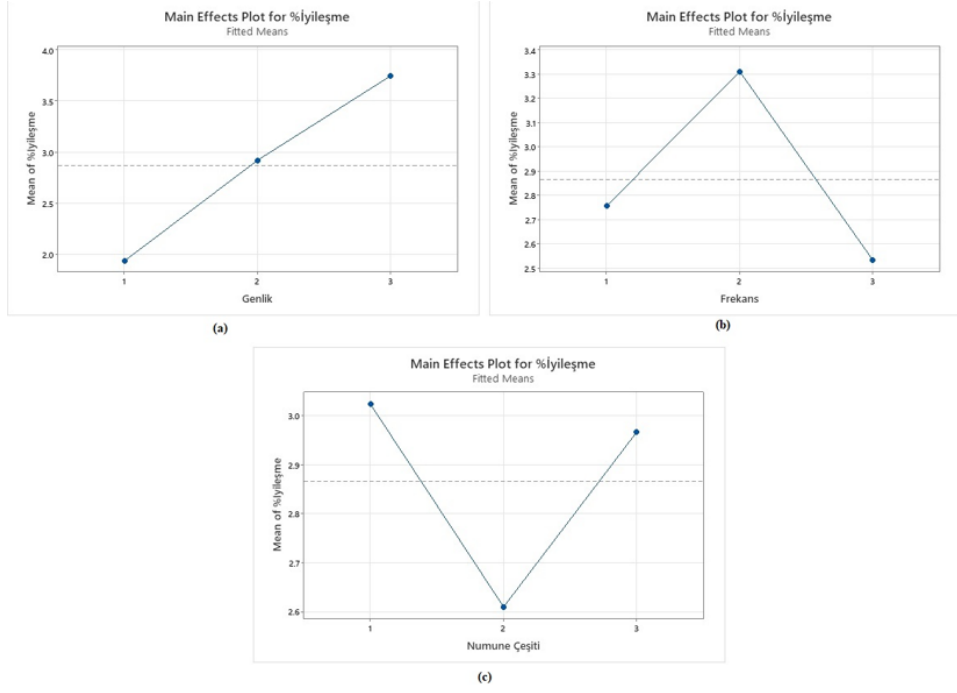


4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Nakajima test metodu ile yedi çeşit test numunesi monoton ve değişken yükleme ile şekillendirilmiştir. Monoton yükleme ıstampanın malzeme hasar oluşuncaya kadar yön değiştirmeden ilerlemesidir. Değişken yüklemede ise bu ilerleme esnasında bir miktar geri çekilme ve geri çekilme miktarı belli bir frekansta gerçekleşmektedir. Değişken yükleme için optimum genlik ve frekans Taguchi deney tasarım metodu ile belirlenmiş olup deneyler optimum parametreler ile yapılmıştır.

Değişken yüklemede kullanılan genlik, frekans, ve numune çeşidi parametrelerinin sonuç değerine etkisi varyans analizi ile incelenmiştir. Sonuç değeri ise değişken yükleme sonucu elde edilen şişme yüksekliğinin monoton yükleme ile kıyaslanmasıdır. Minitab programı üzerinde gerçekleştirilen varyans analizleri neticesinde; parametrelerin yüzde iyileşme üzerine etkileri tespit edilmiştir. (Şekil 4.1.). Varyans analizinde hedeflenen, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerini ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını ortaya koyulabilmektir.

Parametrelerin optimum seviyeleri her zaman için S/N oranının en büyük olduğu durumda gerçekleşmektedir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi; genlik parametresinin üçüncü seviyesi olan 0,25 mm (3) , frekans parametresinin ikinci seviyesi olan 0,68 Hz (2) ve numune çeşidinin üçüncü seviyesi olan G150 (3) değerleri bu deney tasarımı için optimum tasarım parametreleri olduğu görülmüştür. Kontrol parametrelerinin sonuca etkisi incelendiğinde genlik artıkça % iyileşmeye etkisi artmaktadır. Genlik daha fazla artırılmamıştır çünkü şekillendirilen numune ile ıstampanın teması kesilmektedir. Frekans artırıldığında belli bir noktadan sonra %iyileşmeye etkisi azalmaktadır. Numune genişliğine göre % iyileşme çok değişmemiştir.



Şekil 4.1. Kontrol parametre seviyelerinin % iyileşmeye etkisi (a) genlik , (b) frekans (c) numune çeşidi

ANOVA analizinden elde edilen Tablo 4.1.'deki değerlere göre şekillendirilebilirlikteki iyileşmeye en yüksek etki %74.83 oranı ile genliktir. En düşük etkiyi ise numune çeşidi parametresi göstermektedir. Şekillendirilebilirliğe etkileyen ancak deney tasarımına dahil edilmeyen tezgah titreşimi, ortam koşullarından dolayı kullanılan test ekipmanları gibi parametrelerin etkileri %6 hata oranı ile açıklanmıştır.

R-Sq değerine test setinin başarısı için ana kriterdir. Genlik, frekans ve numune çeşidinin değişken yüklemenin şekillendirilebilirliğe etkisinin doğru tanımlanması için R-sq değerinin yüksek olması gerekir. Deneylerden elde edilen anlamlılık katsayısı R-Sq (adj) değeri %76.07 bulunmuştur. R-Sq değerinin 70 değerinden yüksek olması deneysel anlamlılık için yeterli olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1. ANOVA % şekillendirilebilirlik analizi

VARYANS ANALİZİ						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı (Adj SS)	Karelerin Ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri	Parametrelerin Etki Oranı (%)
Genlik	2	4.908	2.454	12.5	0.074	%74.83
Frekans	2	0.959	0.479	2.44	0.290	%14.60
Numune Çeşidi	2	0.301	0.150	0.77	0.566	%4.57
Hata	2	0.392	0.196			%6
Toplam	8	6.562				
Önem	R-sq %94.02 R-sq(adj) %76.07					

Yedi çeşit Nakajima test numunesi monoton ve değişken yükleme ile Şekil 4.2.'deki gibi şekillendirilmiştir. Standartlarda bu boyutlardaki malzemeler için kubbe merkezinden 15 mm ye kadar mesafeden yırtılmaya müsaade edilmektedir. EK-2'de de görüldüğü gibi yapılan testlerde yırtılma genellikle hemen hemen kubbe merkezinde veya merkezden en fazla 6-7 mm ilerde meydana gelmiştir. Dolayısıyla numuneler ve ıstampa arasındaki yağlamanın yeterli olduğu ve kabul edilebilecek derecede düşük sürtünmeler olduğu söylenebilir.



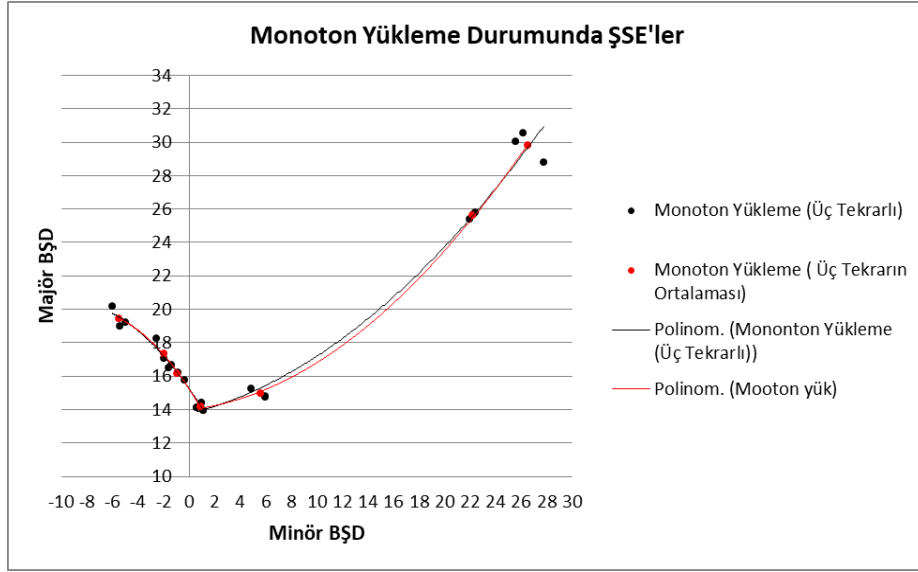
Şekil 4.2. Şekillendirilmiş yedi çeşit Nakajima test numunesi

Monoton ve değişken yükleme durumunda hasar oluşuncaya kadar üç tekrarlı şekillendirilen test numunelerinin şişme yükseklikleri (H) ıstampaın ilerleme miktarından ölçülmüştür. Şekillendirilen bir parçanın şişme yüksekliği (kubbe yüksekliği) şekillendirilebilirlik açısından bir kıyaslanma kavramıdır. Tüm çeşit test numunelerinin üç testin ortalaması alınarak şişme yükseklikleri bakımından yüzde iyileşme oranı Tablo 4.2.'de verilmiştir. Değişken yükleme ile şekillendirilen test numunelerin şişme yükseklikleri monoton yükleme kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Ortalama şişme yüksekliğindeki iyileşme %5.5-6.5 arasındadır.

Tablo 4.2. Monoton ve değişken yükleme durumunda şişme yükseklikleri

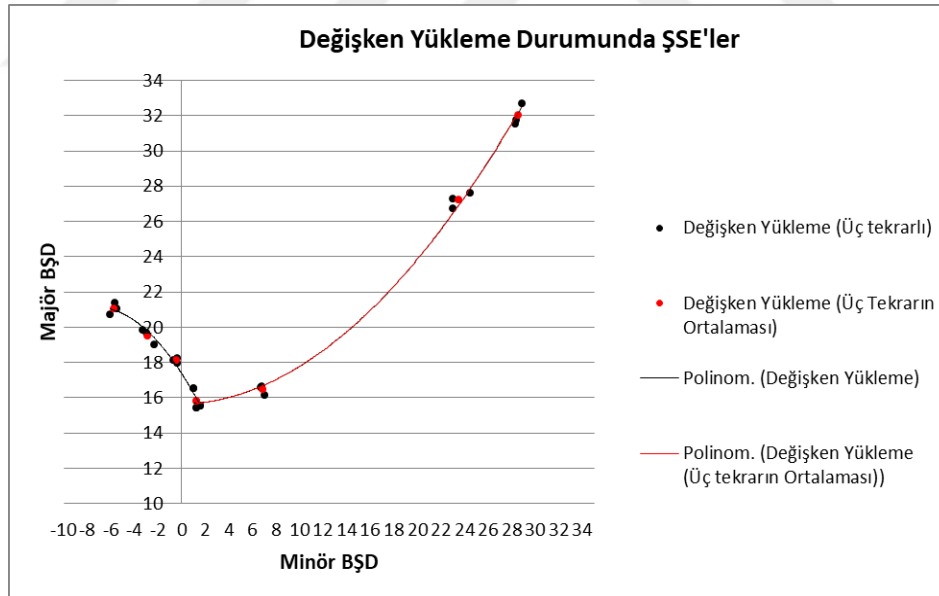
NUMUNE ÇEŞİDİ	YÜKSEKLİK (H) mm		İYİLEŞME %
	MONOTON YÜKLEME	DEĞİŞKEN YÜKLEME	
G25	17.16	18.07	5.30
G50	19.45	20.68	6.31
G75	19.55	20.77	6.24
G100	21.46	22.68	5.68
G125	23.10	24.6	6.64
G150	32.12	33.87	5.44
G175	33.06	34.88	5.67

Her iki yükleme çeşidi ile şekillendirilen test numunesinden üç kesit geçirilerek bunların ortalamasından bir test için sınır BŞD değeri bulunmuştur. Dolayısıyla üç tekrarlı testlerde her bir numune çeşidi için üç adet BŞD değeri bulunabilir. Böylece 7 numune için 21 adet nokta kullanılarak ŞSE çizilebilir (Dilmeç ve ark.,2014). Esasen her numunenin tekrarlarının ortalamasının alınması genel bir yaklaşımdır. Her iki durum içinde sınır BŞD değerlerine polinom eğri uydurulmuştur. Uydurulan eğrilerin R^2 'leri 1'e yakın bir değer çıkmıştır. Monoton yüklemede yukarıda bahsedilen iki farklı durum için çizilen eğriler Şekil 4.3..'de gösterildiği gibi oldukça yakın değerlerde elde edilmiştir. İki durum için çizdirilen eğrilerin denklemlerine aynı sayısal değerleri koyulduğunda ortalama fark %1.47'dir.



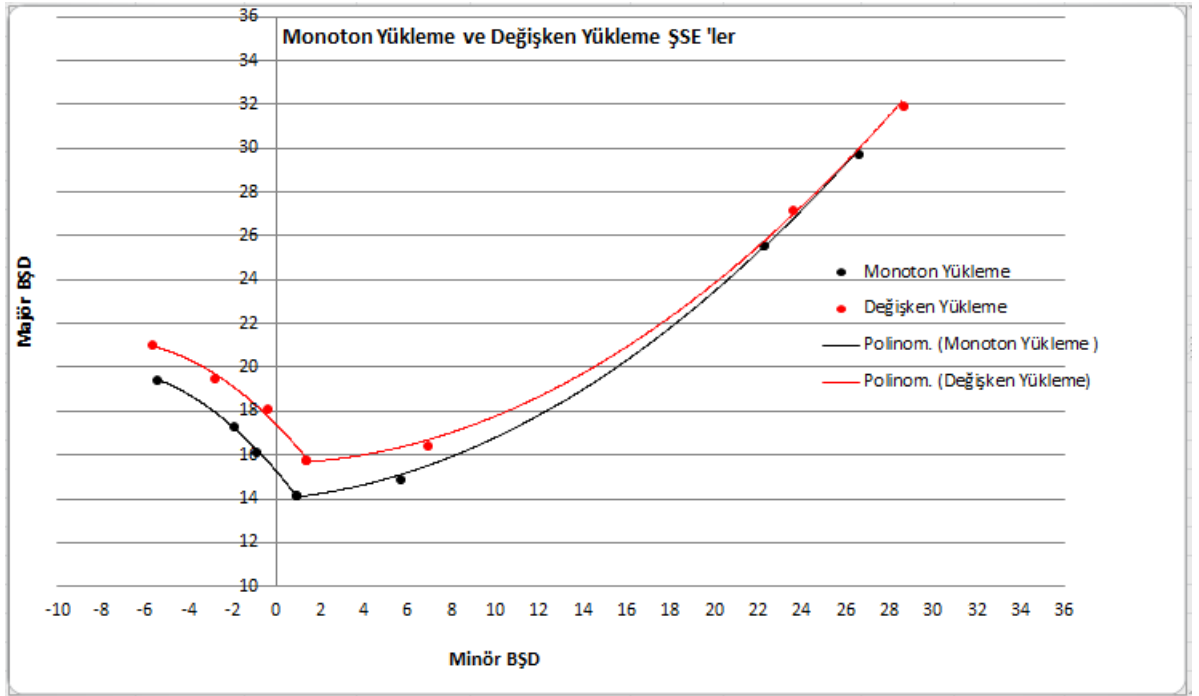
Şekil 4.3. Monoton yükleme durumunda tek tek ve ortalama BŞD değerleri için ŞSE'ler

Değişken yükleme için çizdirilen ŞSE'lerde de aynı durum ortaya çıkmıştır. Ortalama fark %1.05'dir (Şekil 4.4.). Bu nedenle BŞD değerleri literatürde genel olarak kullanıldığı gibi üç testin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Değişken yükleme durumunda tek tek ve ortalama BŞD değerleri ŞSE'ler

Değişken ve monoton yükleme ile elde edilen sınır BŞD'lere eğri uydurularak ŞSE'ler çizilmiştir. Veriler devamlı yükselen veya alçalan durumda ise yani herhangi bir ekstremum oluşmuyorsa genellikle üstel fonksiyon olarak eğri uydurmak önerilmektedir. Bu nedenle verilere üstel eğri uydurulmuş ve Şekil Ek 3.1. ve 3.2.'de görüldüğü gibi uydurulan eğriler özellikle ŞSE'nin sağ tarafındaki verileri tam olarak temsil etmemiştir. Değişken ve monoton BŞD değerleri ŞSE'ler arasına saçılmıştır. Yani farklı yüklemelerdeki etki tam olarak ortaya çıkmamıştır. Bu nedenle 2.derece polinom eğriler uydurulmuştur. Hem R^2 değerleri 1'e daha çok yaklaşmıştır. Hem de veriler polinom eğrilere göre daha belirgin olarak ayrılmıştır. Monoton ve değişken yükleme durumunda elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Monoton ve değişken yükleme durumunda ŞSE'ler

Değişken ve monoton yükleme durumuna göre oluşturulan ŞSE'lerin 2.dereceden polinom denklemlerine aynı minör değerleri konularak şekillendirilebilirlik açısından kıyaslanmıştır. ŞSD'nin sol bölgesinde ortalama iyileşme %10.74, sağ bölgesinde minör BŞD'nin 14 değerine kadar ortalama iyileşme % 7.07 olmuştur. Bu BŞD' den sonra ortalama yüzde iyileşme %1.49 dur. Tüm bölgeler için de ortalama iyileşme %5.67'dir.

Monoton ve değişken yükleme durumunda Nakajima testleri üç tekrarlı yapılmış ve tekrarlanabilirliğin belirlenmesi için majör BŞD'lerin standart sapması hesaplanmıştır. Tablo 4.4.'de görüldüğü gibi ortalama standart sapma monoton yükleme için 0.40, değişken yükleme için de 0.34 ve tüm değerler için de 0.37'dir. Sonuç olarak BŞD'ler %99.9 güvenilirlilikle yani 3σ için %5 hata ile bulunmuştur.

Tablo 4.4. Nakajima testlerinin tekrarlanabilirliği

Numune Çeşidi	Standart Sapma	
	Monoton Yükleme	Değişken Yükleme
G25	0.50	0.25
G50	0.68	0.37
G75	0.30	0.12
G100	0.19	0.50
G125	0.22	0.24
G150	0.16	0.37
G175	0.74	0.51
ORT	0.40	0.34

Farklı genişlikte şekillendirilen test numunelerinin ortalama majör BŞD (ε_1) ve minör BŞD (ε_2)'leri Denklem (1) kullanılarak efektif BŞD olarak hesaplanmıştır. BŞD değerleri olarak üç tekrarın ortalaması alınmıştır. Bu hesaplama işlemi her bir çeşit test numunesi için yapılmıştır

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{(4/3)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2)} \quad (1)$$

Tablo 4.5.' her bir çeşit test numunesi için de majör, minör ve efektif BŞD'ler verilmiştir.

Tablo 4.5. Monoton ve değişken yükleme durumunda % efektif BŞD

NUMUNE ÇEŞİDİ	MONOTON YÜKLEME		DEĞİŞKEN YÜKLEME		EFEKTİF BŞD (%)	
	Minör	Majör	Minör	Majör	Monoton	Değişken
G25	-5.47	19.45	-5.72	21.04	17.65	19.12
G50	-1.96	17.34	-2.85	19.50	16.49	18.32
G75	-0.92	16.15	-0.47	18.11	15.72	17.88
G100	0.90	14.16	1.30	15.82	14.64	16.52
G125	5.60	14.94	6.88	16.44	18.66	21.13
G150	22.23	25.63	23.56	27.21	43.41	46.04
G175	26.53	29.79	28.56	31.99	51.13	54.97

Efektif BŞD artışı kullanılarak Denklem 2’de gösterilen pekleşme kuralı ile efektif gerilme hesaplanmıştır. K mukavament kat sayısı ve n pekleşme üssüdür. Al5754-O temperi için mukavament katsayısı 448 MPa ve pekleşme üssü 0.34 değerleri Türköz M.(2009) çalışmasından alınmıştır.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (2)$$

Tablo 4.5.’de monoton ve değişken yükleme durumu için efektif gerilmeler kıyaslanmıştır. Değişken ve monoton yükleme ile şekillendirilen test numunelerinin efektif gerilmedeki iyileşme olarak kıyaslandığında ortalama iyileşme % 3.41’dir.

Tablo 4.6. Monoton ve değişken yükleme durumunda efektif gerilme

NUMUNE ÇEŞİDİ	EFEKTİF GERİLME (MPa)		FARK %
	MONOTON YÜKLEME	DEĞİŞKEN YÜKLEME	
G25	248.4	255.3	2.75
G50	242.7	251.6	3.65
G75	238.8	249.5	4.49
G100	233.1	242.9	4.18
G125	253.1	264.1	4.31
G150	337.3	344.1	2.02
G175	356.6	365.5	2.49

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Al 5754-O alaşımının oda sıcaklığındaki Şekillendirme Sınır Eğrileri (ŞSE) monoton ve değişken yükleme durumuna göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel yöntem olarak Nakajima testi kullanılmıştır. Nakajima testinin gerçekleştirilmesinde ve test numunelerinin belirlenmesinde farklı yıllarda yayınlanan standartlar vardır.

ŞSE'ler oluşturulmadan önce, ASTM- E- 2218-02 (Ağustos-2002) ve ISO 12004-2 (Ekim- 2008) standartlarının hangisinin kullanılmasının uygun olacağı araştırılmış ve ISO standardına göre elde edilen eğrilerin daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür (Dilmeç ve ark. 2014). Bu yüzden test numunelerin belirlenmesi ve hesaplanmasında ISO-12004 standardı kullanılmıştır. Standartta göre test numuneleri lazer kesim ile kestirilmiş ve serigrafi yöntemiyle gridlenmiştir.

Nakajima testinde kullanılan değişken yükleme profilinin genlik ve frekansı Taguchi deney tasarım metoduna göre belirlenmiştir. Genlik, frekans ve numune çeşidinin şekillendirilebilirliğe etkisi incelenmiştir.

Şekillendirme sonucu sınır BŞD'leri belirleyebilmek amacıyla, manuel ölçme yöntemi olan Asame 4.1. programı kullanılmıştır. Bu program ile, şekillendirme sınır eğrilerini ISO 12004-2 standardına uygun ve güvenilir olarak elde edilmiştir. Otomatik elde edebilen ancak pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine gerek duymadan sınır BŞD'ler basitçe ve güvenilir olarak belirlenebilmiştir. Daha sonra ŞSE'ler her iki durum için oluşturulmuş ve kıyaslanmıştır.

Çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Istampa ile sacın temas ettiği yüzeyde ki sürtünmeyi azaltmak için yağlama olarak katı parafin ve gres kullanılmıştır. Sürtünme arttığı zaman hasar kubbe merkezinden uzaklaşmaktadır. Standartta göre hasar kubbe merkezinden en fazla 15 mm kadar uzaklıkta olabilir. Yapılan testlerde yırtılma genellikle hemen hemen kubbe merkezinde veya merkezden en fazla 6-7 mm ilerde meydana gelmiştir. Standartta uygun sürtünmeler elde edilmiştir.

. Istampaya ile şekillendirilecek olan farklı genişlikte ki numune çeşitlerine uygulanacak olan değişken yüklemenin en uygun genlik ve frekansın belirlenmesinde Taguchi deney tasarım metodu kullanılmıştır. En optimum genlik 0.25 mm ve frekans 0.68 Hz bulunmuştur. Genlik artıkça % iyileşmeye etkisi artmaktadır. Genlik daha fazla artırılmamıştır çünkü şekillendirilen numune ile istampanın teması kesilmektedir. Frekans artıyından belli bir noktadan %iyileşme etkisi azalmaktadır. Numune genişliğine göre % iyileşmenin çok değişmemiştir. Sonuç olarak Genliğin artırılması şekillendirilebilirliğe olumlu etkilediği, frekansın artırılmasında bir noktadan sonra şekillendirilebilirliği düştüğü görülmüştür. ANOVA varyans analizinden elde edilen değerlere göre genliğin prosese etkisi %74.83, frekansın etkisi % 14.60 ve numune çeşidinin etkisi % 4.57 bulunmuştur. Kontrol edemediğimiz şekillendirme presi titreşimi, ortam koşullarının etkisi (hata oranı) %6 'dır.

Değişken ve monoton yükleme ile şekillendirilen test numunelerinin şişme (kubbe) yükseklikleri kıyaslandığında ortalama iyileşme % 6.15'dir.

Değişken ve monoton yükleme durumuna göre oluşturulan ŞSE'ler kıyaslandığında sol tarafta ortalama iyileşme %10.74, sağ bölgesinde ise 14 BŞD değerine kadar ortalama %7.07 olmuştur. 14 BŞD değerinden sonra değişken yüklemenin etkisi yok denecek kadar azdır. Bütünsel olarak düşünüldüğünde, değişken yüklemenin monoton yüklemeye göre şekillendirilebilirliği olumlu etkilediği söylenebilir.

ŞSE₀ olarak da adlandırılan, en düşük majör değeri literatürde y eksenini üzerinde olup minör BŞD'si sıfır olmaktadır. Ancak bu çalışmada ŞSE₀ noktası sağa ötelenmiştir. Monoton yükleme durumu için elde edilen ŞSE₀ noktası 0.90 BŞD ve değişken yükleme durumu için 1.13 BŞD ötelenmiştir. Bu durumu literatürde araştırıldığında AA-2024-T4 alaşımlı malzemenin ŞSE'lerin sac kalınlığına göre değişiminin incelendiği çalışmada da bu durum meydana gelmiştir. Araştırdığında kalıplardaki süzdürme çubuklarına, yapılan ısıtılma ve eğilme etkisine bağlanmaktadır (Dilmeç ve ark,2014).

Her bir çeşit test numunesi için tekrarları arasında ki standart sapma monoton yükleme için 0.40 BŞD'dir. Değişken yükleme durumu için 0.34 BŞD'dir. Sonuç olarak BŞD'ler %99.9 güvenilirlikle yani 3σ için %5 hata ile bulunmuştur. Bu hata da kabul edilebilir bir değerdir.

Değişken ve monoton yükleme ile şekillendirilen test numunelerinin efektif gerilmedeki iyileşme olarak kıyaslandığında ortalama iyileşme % 3.41’dir.

Öneriler

Bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması için, çizilen ŞSE’lerin anlamlı olduğunu göstermek üzere, endüstriyel parçalar şekillendirilerek monoton yükleme ile üretilmeyecek iş parçalarının değişken yükleme ile üretilebileceği durum çalışmaları yapılabilir. Böylece değişken yüklemenin avantajı daha belirgin olarak ortaya konulabilir.



KAYNAKLAR

An H., Multi-objective Optimization of Tube Hydroforming Using Hybrid Global and Local Search

Affronti E., Merklein M., 2018, Analysis of the bending effects and the biaxial pre-straining in sheet metal stretch forming processes for the determination of the forming limits, International Journal of Mechanical Sciences, 138-139, 295-309.

Ashrafi A., Khalili K., 2015, Investigation on the effects of process parameters in pulsating hydroforming using Taguchi method, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 230, 7, 1203-1212.

Başer T.A., Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı, Mühendis ve Makina, 53, 635, 51-58

Banabic D., Bunge H.J., Pöhlandt K., Tekkaya A.E., 2000. Formability of Metallic Materials. Springer-Verlag, Almanya.

Çakanyıldırım Ç., Gürü M., 2021, Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları, Politeknik Dergisi, 24, 2, 585-592.

Campbell F.C., 2006, Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, First Edition, Elsevier Ltd., Great Britain.

Davis J.R., 1993, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, 199-230.

Dilmeç M., 2014, 2024-T4 Alüminyum Sacların Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Kalınlığa Göre Değişimi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 12-13.

Dilmeç M., Halkacı H.S., Öztürk F., 2014, Investigation into reasons for minimum major strain offsetting of forming limit curve obtained with nakajima test for AA2024-T4, Journal Of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29, 3.

Galanulis K., Optical measuring technologies in sheet metal processing, GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7, Germany,

Jahromi S.A.J., Nazarboland A., . Mansouri E., Abbasi S., 2006, Investigation of Formability of Low Carbon Steel Sheets by Forming Limit Diagrams, Iranian Journal of Science&Technology, Transaction B, Engineering, 30, B3, 377-385.

Lamberts S., 2005, Effect of EDT on Formability of Aluminum Automotive Sheet, NGTC (Novelis Global Technology Centre) Report

- Lewison, D.J., 1999, An Assessment of Different Experimental Methods for Determination of Forming Limits, Master's Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute
- Loh-Mousavii M., Bakhshi-Jooybari. M, Mori K., 2008, Mechanism of Improvement of Formability in Pulsating Hydroforming of T-shape Tubes, 42, 1 ,29-35
- Karalı, M., Şahin, S., Hayat, F. ve Çevik, E., 2011, AL 6061 alaşımı sacların yaşlandırılmasının derin çekmeye etkilerinin incelenmesi”, International Iron & Steel Symposium, s.1307-1314.
- Koç M, Altan T., 2002, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process. Intl. J. Machine Tools & Manufacture, 42,123–138.
- Mori K., Maeno T., Maki S., 2007), Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tubes, J. Machine Tools & Manufacture 47, 978–984
- Mori K., Patwari A.U., Maki S., 2004 , Improvement of formability by oscillation of internal pressure in pulsating hydroforming of tube, Annals of the CIRP 53 (1) ,215–218.
- Öztürk F., Dilmeç M., Türköz M., Ece E.R., Halkacı H.S., 2009, Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability, The 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Turkey,18-21, 41-49.
- Raghavan, K.S., 1995, A Simple Technique to Generate In-Plane Forming Limit Curves and Selected Applications, Metallurgical and Materials Transactions A, 26A, 2075-2084.
- Smith, W. F. 2001. Material Science& Engineering, University of Central Florida, USA.
- Situ, Q., 2008, A New Approach to Obtain Forming Limits of Sheet Materials, Doctoral Thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario.
- Siegert, K. and Wagner, S., 1994, Formability Characteristics of Aluminium Sheet, Training in Aluminium Application Technologies (TALAT).
- Türköz M., 2009, Al 2024 ve Al 5754 Alaşımli Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 11-17
- Toros S., 2013, TRIP800 Çeliğinin Şekillendirme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 81-83.

Yang L., Tang D., He Y., 2017, Describing tube formability during pulsating hydroforming using forming limit diagrams, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 52(4), 249-257.

Zhang S. H. ,Danckert J. 1999 Development of hydro-mechanical deep drawing. Journal of Materials Processing Technology 83: 14–25

