



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**METAL TALAŞLARININ SIKIŞMA KABİLİYETLERİNİN
FARKLI KALIP GEOMETRİLERİNDE TEORİK VE
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Suat KOÇOĞLU

Danışman
Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

SAMSUN
2023

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**METAL TALAŞLARININ SIKIŞMA KABİLİYETLERİNİN
FARKLI KALIP GEOMETRİLERİNDE TEORİK VE
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Suat KOÇOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Suat KOÇOĞLU tarafından, Prof. Dr. Kemal YILDIZLI danışmanlığında hazırlanan “METAL TALAŞLARININ SIKIŞMA KABİLİYETLERİNİN FARKLI KALIP GEOMETRİLERİNDE TEORİK VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 30.1.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ Fırat Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Afşin Alper CERİT Erciyes Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Kemal YILDIZLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim İNANÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

30 / 01 / 2023
Suat KOÇOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : METAL TALAŞLARININ SIKIŞMA KABİLİYETLERİNİN FARKLI KALIP GEOMETRİLERİNDE TEORİK VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 04.01.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 7

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

30 / 01 / 2023
Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

ÖZET

METAL TALAŞLARININ SIKIŞMA KABİLİYETLERİNİN FARKLI KALIP GEOMETRİLERİNDE TEORİK VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Suat KOÇOĞLU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Ocak/2023
Danışman: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Geri dönüştürülecek metal talaşları, ergitmeden önce şarj kalitesini arttırmak, depolama ve lojistik faaliyetlerini kolaylaştırmak için dairesel kalıplarda sıkıştırılarak briket haline getirilir. Bu çalışmada, farklı kalıp geometrilerinin AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşlarının sıkışma kabiliyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kalıp geometrisi, talaş boyutu, talaş miktarı ve kuvvet miktarı sıkıştırma işlemini etkileyen faktörler olarak belirlenmiştir. Her bir faktör için 3 seviye uygun görülmüştür. Faktör ve seviye sayısına bağlı olarak Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılmıştır. Tasarımda yer alan her bir deney kombinasyonu üçer defa tekrar edilmiş, bu üç tekrarın yoğunluklarının ortalaması alınarak ortalama yoğunluk değerleri bulunmuştur. Regresyon yöntemiyle tüm numune kompozisyonlarına uygun ve kuvvet faktörüne bağlı yoğunluk denklemleri oluşturulmuştur. Hacimsel doluluk oranının en yüksek değerinin, AISI 1040 talaşı için % 39 ile altıgen kalıpta, AA7075 talaşı için % 19,43 ile kare kalıpta ve Ms62 için % 41,90 değeri ile dairesel kalıpta olduğu bulunmuştur. Denklem oluşturularak elde edilen net basınç değerleri karşılaştırıldığında, dairesel kalıbın kare kalıba göre % 5, altıgen kalıba göre %11 daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Ayrıca Abaqus yazılımından elde edilen şekil değiştirme enerjisi verilerine göre en yüksek şekil değiştirme enerjisinin 3090,99 mJ büyüklüğünde ve dairesel kalıpta olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Metal talaşları, Basma deneyi, Sıkıştırma kalıbı, Briketleme

ABSTRACT

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COMPRESSION CAPABILITY OF METAL CHIPS IN DIFFERENT MOLD GEOMETRIES

Suat KOÇOĞLU

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Ph.D., January/2023

Supervisor: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

The metal chips to be recycled are compressed into briquettes in circular molds in order to increase the charge quality and facilitate storage and logistics activities before melting. In this study, the effect of different die geometries on the compaction ability of AISI 1040, AA7075 and Ms62 chips was investigated. Die geometry, chip size, chip amount and force amount were determined as factors affecting the compaction process. Three levels were considered appropriate for each factor. Depending on the number of factors and levels, the experimental design was made with the Taguchi method. Each combination of experiments in the design was repeated three times, and the average intensity values were found by taking the average of the intensities of these three repetitions. With the regression method, density equations suitable for all sample compositions and depending on the force factor were created. It was found that the highest value of the volumetric fill rate was found in the hexagonal mold with 39% for AISI 1040 chips, in the square mold with 19.43% for AA7075 chips and in the circular mold with a value of 41.90% for Ms62. When the net pressure values obtained by creating the equation were compared, it was determined that the circular mold gave 5% better results than the square mold and 11% better results than the hexagonal mold. In addition, according to the strain energy data obtained from the Abaqus software, it was observed that the highest strain energy was 3090.99 mJ in the circular mold.

Keywords: Metal chips, Compression test, Compression mold, Briquetting

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İlk öğretmenim rahmetli annem Şehnaz Koçoğlu'na, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam Abdurrahman Koçoğlu'na, emeğini ve sabrını bir an olsun üzerimden eksik etmeyen en büyük desteğim değerli eşim Zelifa Koçoğlu'na, çalışmam süresince gösterdikleri sabır ve anlayışla yanımda olan kızlarım Feyza ve Dila Koçoğlu'na, desteklerini esirgemeyen Sayın Lütfiye ve İsmail Yıldız'a ayrıca teşekkür ederim.

Doktora eğitimin süresince bilgi ve tecrübesiyle beni her zaman destekleyen, dinleyen, yol gösteren ve cesaretlendiren değerli hocam, danışmanım Sayın Prof. Dr. Kemal Yıldızlı 'ya üzerimdeki tüm emekleri için çok teşekkür ederim. Araştırma Görevlisi Erkan Öztürk, Araştırma Görevlisi Cengiz Görkem Dengiz ve Galip Torna San. Tic. Ltd. Şti. yetkililerine destekleri nedeniyle teşekkürlerimi sunarım.

Suat KOÇOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür	7
1.2. Özgün Değer	14
2. MATERYAL VE YÖNTEM	16
2.1. Deney Tasarımı	17
2.1.1. Klasik Metot İle Deney Tasarımı	17
2.1.2. İstatiksel Metot İle Deney Tasarımı	18
2.2. Malzeme Ve Sınıflandırılması	35
2.3. Deney Düzenegi	38
2.3.1. Hacimsel Doluluk Oranı	39
2.3.2. Yoğunluk	40
2.4. Matematiksel Metot	40
2.4.1. Dairesel Kalıpta Gerilme Durumu	41
2.4.2. Altıgen Kalıpta Gerilme Durumu	42
2.4.3. Kare Kalıpta Gerilme Durumu	43
2.5. Sonlu Elemanlar Metodu	45
2.6. Kabuller	46
3. BULGULAR	48
3.1. İstatistiksel Metot	48
3.1.1. AISI 1040 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi Sonuçları	48
3.1.2. AA7075 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi Sonuçları	51
3.1.3. Ms62 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi	55
3.2. Deneysel Metot	59
3.2.1. AISI 1040 Talaşı Baskı Numuneleri	59
3.2.2. AA7075 Talaşı Baskı Numuneleri	64
3.2.3. Ms62 Talaşı Baskı Numuneleri	68
3.3. Matematiksel Metot	72
3.4. Sonlu Elemanlar Metodu	74
3.4.1. Dairesel Geometri	74
3.4.2. Altıgen Geometri	79
3.4.3. Kare Geometri	84
4. TARTIŞMA	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	92
KAYNAKÇA	94
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

h_i	: Sıkıştırılmamış talaş ilk boyu
h_s	: Sıkıştırılmış talaşın numunesinin kalınlığı
Δh	: Zimba ilerleme miktarı
S	: Sinyal (Girdi değeri)
N	: Gürültü (Çıktı değeri)
y	: Sonuç değeri
$\bar{y}$	: Dizinin aritmetik ortalaması
s^2_y	: Standart sapma
D	: Numune çapı
a	: Altıgenin kenar uzunluğu
b	: Karenin kenar uzunluğu
L	: Sıkıştırma yüksekliği
P_0	: Zimba tarafından uygulanan basınç
P_x	: Net sıkıştırma basıncı
σ_r	: Kalıp yan yüzeyi gerilmesi
d_x	: Birim eleman kalınlığı
μ	: Sürtünme katsayısı
k	: Gerilme faktörü
F	: Zimba baskı kuvveti
X	: Bağımsız değişken
Y	: Bağıl değişken
i	: Kesişim değeri
s	: Doğrunun eğimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Atık yönetimi akış diyagramı (Evreka, 2023).....	2
Şekil 1.2. Türkiye’de faaliyet gösteren lisanslı geri dönüşüm tesisi sayıları	2
Şekil 1.3. a) Metal hurda pres makinası örneği b) Hurda briketi	5
Şekil 1.4. Talaş Briketleme a) Briket makinesi b) Briket basımı.....	6
Şekil 1.5. Ecocut serisi briketleme cihazı teknik verileri.....	7
Şekil 2.1. Sıkıştırma işlemi (a) İşlem öncesi; (b) İşlem sonrası.....	16
Şekil 2.2. Klasik metot ile yapılan deneylerde ilerleme aşamaları	18
Şekil 2.3. Sonuç değişkeni köşelerde gösterilmiş faktöriyel deney	19
Şekil 2.4. Etkileşimler ile gösterilmiş faktörlü faktöriyel deney	20
Şekil 2.5. Etkileşimsiz A Faktöriyel Deneyi.....	21
Şekil 2.6. Etkileşimli Faktöriyel Deneyi.....	21
Şekil 2.7. Minitab istatistik programı ara yüzü	33
Şekil 2.8. Sıkıştırma kalıpları (a) Dairesel; (b) Kare; c) Altıgen	34
Şekil 2.9. Kalıp tasarım görünüşleri, (a) Montaj; (b) Kesit	35
Şekil 2.10. Elek boyutları, (a) $x < 2$ mm; (b) $2 < x < 5$ mm	37
Şekil 2.11. AISI 1040 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın	37
Şekil 2.12. AA7075 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın	37
Şekil 2.13. Ms62 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın.....	38
Şekil 2.14. Basma deney düzeneği.....	39
Şekil 2.15. Dairesel kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler.....	41
Şekil 2.16. Altıgen kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler	43
Şekil 2.17. Kare kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler	44
Şekil 2.18. C3D8R eleman modeli.....	45
Şekil 3.1. AISI 1040 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri	49
Şekil 3.2. AA7075 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri	53
Şekil 3.3. Ms62 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri	57
Şekil 3.4. AISI 1040 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel.....	61
Şekil 3.5. AA7075 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel.....	65
Şekil 3.6. Ms62 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel	69
Şekil 3.7. $P_x - \Delta h$ değişim grafiği.....	74
Şekil 3.8. AISI 1040 için dairese geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş).....	75
Şekil 3.9. AISI 1040 için dairese geometride gerilme durumu (Kesit görünüş).....	75
Şekil 3.10. Dairesel geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği.....	76
Şekil 3.11. AA7075 için dairese geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş).....	76

Şekil 3.12. AA7075 için dairesel geometride gerilme durumu (Kesit görünüş).....	77
Şekil 3.13. Dairesel geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	77
Şekil 3.14. Ms62 için dairesel geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)	78
Şekil 3.15. Ms62 için dairesel geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)	78
Şekil 3.16. Dairesel geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	79
Şekil 3.17. AISI 1040 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş).....	80
Şekil 3.18. AISI 1040 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)	80
Şekil 3.19. Altıgen geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	81
Şekil 3.20. AA7075 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)	81
Şekil 3.21. AA7075 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)	82
Şekil 3.22. Altıgen geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	82
Şekil 3.23. Ms62 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş).....	83
Şekil 3.24. Ms62 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş).....	83
Şekil 3.25. Altıgen geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	84
Şekil 3.26. AISI 1040 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)	85
Şekil 3.27. AISI 1040 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)	85
Şekil 3.28. Kare geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	86
Şekil 3.29. AA7075 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)	86
Şekil 3.30. AA7075 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)	87
Şekil 3.31. Kare geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı.....	87
Şekil 3.32. Ms62 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş).....	88
Şekil 3.33. Ms62 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş).....	88
Şekil 3.34. Kare geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafığı	89

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. 2 ⁷ deney sayılı tam eşleştirmeli bir deneyde ana ve etkileşim etkileri	23
Tablo 2.2. Taguchi metoduna göre L9 ortogonal deney tasarımı	28
Tablo 2.3. Taguchi metoduna göre L9 ortogonal deney tasarımı	29
Tablo 2.4. L12 ortogonal deney tasarımı	29
Tablo 2.5. Faktörler ve seviyeleri	33
Tablo 2.6. Taguchi deney tasarımı.....	34
Tablo 2.7. AISI 1040 çeliğinin kimyasal özellikleri	35
Tablo 2.8. AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri.....	35
Tablo 2.9. AA7075'in kimyasal özellikleri	36
Tablo 2.10. AA7075 alaşımının mekanik özellikleri.....	36
Tablo 2.11. Ms62 'nin kimyasal özellikleri	36
Tablo 2.12. Ms62 'nin mekanik özellikleri.....	36
Tablo 2.13. Elek ebadına göre talaş boyutu sınıflandırması	38
Tablo 2.14. Farklı kalıp denklemleri ile hesaplanmış Px basınç büyüklükleri	44
Tablo 2.15. AISI 1040 malzemesinin elastik özellikleri.....	45
Tablo 2.16. AA7075 malzemesinin elastik özellikleri.....	46
Tablo 2.17. Ms62 malzemesinin elastik özellikleri	46
Tablo 2.18. Tez kapsamında yapılmış olan kabuller.....	46
Tablo 3.1. AISI 1040 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması.....	48
Tablo 3.2. Taguchi tahmin değeri (AISI 1040 için).....	50
Tablo 3.3. Anova ile varyans analizi sonuçları (AISI 1040 için).....	50
Tablo 3.4. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (AISI 1040 için)	50
Tablo 3.5. AA7075 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması.....	52
Tablo 3.6. Taguchi tahmin değeri (AA7075 için).....	53
Tablo 3.7. Anova ile varyans analizi sonuçları (AA7075 için).....	54
Tablo 3.8. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (AA7075 için)	54
Tablo 3.9. Ms62 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması	56
Tablo 3.10. Taguchi tahmin değeri (Ms62 için)	57
Tablo 3.11. Anova ile varyans analizi sonuçları (Ms62 için)	58
Tablo 3.12. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (Ms62 için).....	58
Tablo 3.13. AISI 1040 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri	62
Tablo 3.14. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (AISI 1040)	63
Tablo 3.15. AA7075 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri	66
Tablo 3.16. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (AA7075)	67
Tablo 3.17. Ms62 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri.....	70
Tablo 3.18. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (Ms62)	71

Tablo 3.19. Farklı kalıp denklemleri ile hesaplanmış P_x basınç büyüklükleri	72
Tablo 3.20. $\Delta h-P_x$ değişimi	73
Tablo 3.21. Kalıp geometrilerine bağlı yan yüzey alanı büyüklüğü	73



1. GİRİŞ

İnsanlar ihtiyaçlarını karşılamak ve hayatını sürdürebilmek için bazı doğal ya da doğal olmayan kaynakları kullanmak zorundadır. Bu zorunlu tercihin neticesi olarak kullandığımız kaynakların bir kısmı işlevini yerine getirmeye devam ederken bazıları kullanım ömrünü tamamlar veya kullanılamaz hale gelir. Bu kaynakların işe yaramayan ve atılan kısmı atık olarak adlandırılır. Çevre için zarar oluşturabilecek kullanım ömrünü tamamlamış ve artık istenmeyen her türlü madde atık madde olarak tarif edilmektedir (Öktem, 2016).

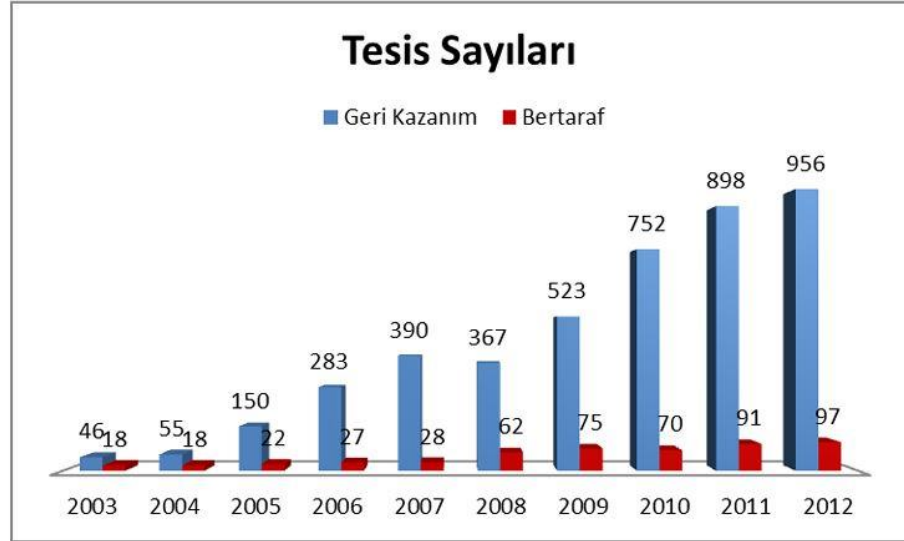
Bu atıklar çevreye, sosyal yaşama ve ülkelerin ekonomik gelişmelerine olumsuz yönde etkilere neden olabilir. Özellikle yakıldıklarında açığa çıkan zararlı gazlar nedeniyle kanser gibi çeşitli hastalıklar ortaya çıkmaktadır. Zehirli atık maddeler, suyu, toprağı ve havayı kirleterek; insanlar, diğer türler ve ekosistemler için daha fazla soruna neden olabilir (Skanska, 2012). Doğal kaynakların israf edilmesinin önüne geçmek, hayat standartlarını yükseltmek ve giderek artan enerji ihtiyacını azaltmak amacıyla özellikle gelişmiş ülkeler tarafından atık maddelerin geri kazanılması ve dönüştürülmesi gibi hususlarda giderek yoğunluğu ve büyüklüğü artan bir faaliyet göze çarpmaktadır. Bu bağlamda Avrupa Ekonomik Topluluğuna üye ülkeler atıkların geri kazanılmasını kanunlar ile yasalaştırarak zorunlu hale getirmişlerdir. Kalkınmakta olan veya az gelişmiş ülkelerin de mevcut tabii kaynaklarını daha etkin ve faydalı kullanmak amacıyla atıkların geri kazanılması için çaba göstermesi, konu ile ilgili araştırmalar yapmaları ve yönetim organları aracılığı ile geri kazanımı teşvik eden faaliyetler yürütmeleri artık kaçınılmaz bir durumdur.

Ülkemizde gerçekleşen hızlı ekonomik büyüme, teknolojik gelişme, sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı ve refah seviyesinin yükselmesi üretilen atık miktarında artış yaşanmasına neden olmaktadır. Giderek artan atık madde miktarı ve bu artış nedeniyle karşılaşılan çevresel ve ekonomik zorluklar, en az atık veya mümkünse atıksız bir yaşam tarzını hedefleyen ve odak noktasız noktası ayık yönetimi olan daha akılcı ve uzun vadeli politikalar gerektirmektedir (Curi ve Kocasoy, 1982). Atık yönetimi; evsel, tıbbi, tehlikeli ve tehlikesiz atık maddelerin minimize edilmesini, toplanarak kaynak noktasında sınıflandırılmasını, geçici depolama alanlarında depolanmasını, nakliyesini, geri kazanılmasını, geri dönüştürülmesini ve bertarafını içermektedir. Atık yönetimi sürecinde en az ve en çok tercih edilen uygulamalar Şekil 1.1 de atık yönetimi iş akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Atık yönetimi akış diyagramı (Evreka, 2023)

Atık malzemelerin tekrar kullanılabilmesi öncesinde mutlaka geri dönüşüm tesislerinde sınıflandırılarak depolanması gerekir. Bu nedenle geri dönüşüm sektörünün önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Şekil 1.2’de Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ‘nın verilerine göre 2003-2012 süre aralığında ülkemizde lisans alarak geri dönüşüm ve bertaraf işlemlerini yürüten firma sayısının oldukça hızlı bir artış gösterdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye’de faaliyet gösteren lisanslı geri dönüşüm tesisi sayıları (Sgm, 2014)

Atık yönetimi ve mevzuatları doğal çevreyi korumak amacıyla yürütülen politikalar arasında önemli bir paya sahiptir. Bu politikaların en önemlisi sayılabilecek sürdürülebilir kalkınma stratejileri, atık maddeleri insan ve çevre için önemli bir tehdit

unsuru olmaktan çıkarıp fayda sağlanabilecek bir ürün haline dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Ve tüm dünyada giderek artan bir öneme sahip olmaktadır (Sgm, 2014).

Atık maddelerin büyük bir kısmı geri dönüştürme işlemleri ile yeniden kullanılabilir hale getirilmektedir. Atıklar içerisinde yer alan plastik, metal, kâğıt, cam, kauçuk veya ahşap gibi maddeler bilimsel altyapısı olan çeşitli metotlar ile fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilerek yeni hammaddelerin üretilmesi sağlanabilmektedir. Atık maddelerin tekrar kazanılarak çeşitli üretim prosesleri ile hammadde haline çevrilmesi ve bu hammaddelerin karton kutu, yeniden kullanılabilir plastik, gübre, kâğıt, metal malzeme yapımında kullanılarak ürün elde edilmesi işlemlerine geri dönüştürme faaliyetleri adı verilir. Çevre ve ekonomi için en doğru adım, atık maddelerin ayrıştırılıp sınıflandırılarak, çevre için uygunluğu ilgili mevzuatlar gereğince kabul görmüş depolama tesislerinde toplanmasıdır. Geri dönüşümü mümkün olan materyallerin tekrar kazanımı mümkün olmayan vasıfsız atıklar ile karıştırılması ve hammaddeye dönüştürülmesi durumunda elde edilecek ürünlerin kalitesi de oldukça düşmektedir. Bu nedenle geri dönüşüm faaliyetlerinin en önemli ve temel aşamasını kaynağında ayırma ve depolama işlemleri oluşturur.

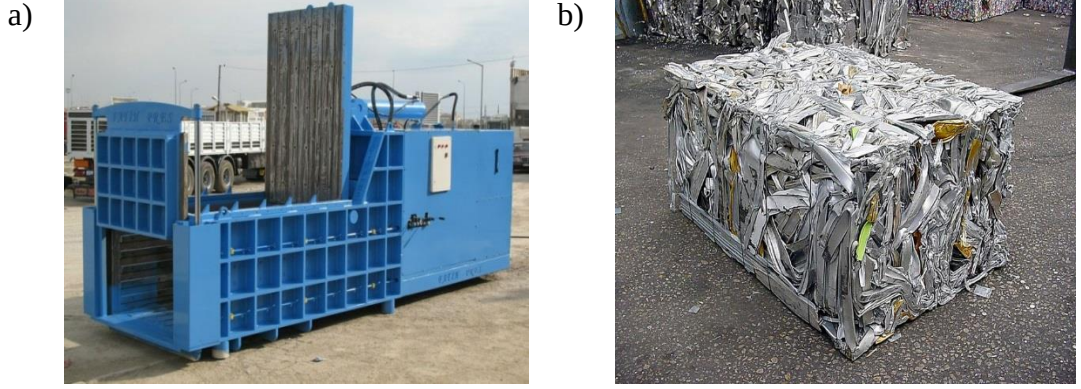
Geri dönüşüm sektörü ve bu sektör altında oluşmuş olan geri dönüşümcülük mesleği tüm dünyada giderek artan bir öneme haizdir. Son dönemlerde gerek diğer dünya ülkelerinde gerekse ülkemizde gözlenen ekonomik koşullardaki değişim nedeni ile insanlar meslek değiştirmeye başlamıştır. Geri dönüşüm sektörünün rağbet görmesinin temel sebebi; nakit sermaye akışının sorunsuz ve çabuk olmasıdır. Ayrıca demir çelik sektöründe giderek artan hammadde arayışındaki artış bu sektörün yaygınlaşmasında önemli rol oynamaktadır. Değişen koşul ve ihtiyaçlar karşısında bu sektörde de değişiklikler gözlenmektedir (Curi ve Kocasoy, 1982). Atık çeşitleri imalat sektöründen kaynaklı metal ve plastik atıklar, belediye atıkları, tehlikeli atık, atık su, radyoaktif atık ve diğerleridir (Esenduran vd., 2012). Tüm metal malzemeler ile birlikte karton, kâğıt, cam, plastik, kumaş gibi malzemelerin geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması ülkemize ait doğal kaynakların çabuk tükenmesinin önüne geçeceği gibi, bu maddelerden üretilen hammadde ihtiyacını azaltmakta ve ülkemizin bu hammadde için dışa bağımlılığını ve yurt dışına aktarılan sermaye akışını azaltmaktadır. Ayrıca zaman ve tüketilen enerjiden de önemli ölçüde tasarruf sağlanmış olacaktır.

Belirtilmiş olan bu vasıflarıyla birlikte geri dönüşüm faaliyetlerinin bir önemli faydası da katı atık miktarındaki azalma ve bu azalma neticesinde çevre kirliliğinin önemli oranda önüne geçilmiş olunmasıdır. Büyük toprak alanına sahip olmayan küçük ölçekli ülkelerde atık depolama alanlarının tesis edilmesi için yeterli alan olmaması sebebiyle oldukça güç bir durum ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle özellikle bu tip ülkelerde katı atıkların kaynağında ayrıştırılması ve hızlıca geri dönüştürülmesi büyük faydalar sağlamaktadır. İmalat sektörlerinde faaliyet gösteren firmalar çevre yönetimi ile ilgili mevzuatlar gereği metal atık sorunu karşı karşıya kalmıştır ve sürdürülebilirliğe ulaşmak için yenilikçi teknolojileri üretken süreçler ile hemen tamamlamak zorundadırlar (Simon vd., 2017). Yapılan bilimsel çalışmalarda metal malzemelerin tekrar kazanılması için tüketilen enerjinin, metallerin cevher şeklinde madenlerden çıkartılarak hammadde olarak üretilmesi için tüketilen enerjiden çok daha az olduğu kanıtlanmıştır. Örnek vermek gerekirse, geri kazanım metotları ile elde edilmiş metalden 1 ton alüminyum üretmek için ihtiyaç duyulan enerji cevherden üretilen alüminyum için tüketilen enerjinin % 4 'ü kadardır. Bu oran bakır için %13 demir-çelik metal malzeme gruplarında ise %19 kadardır. Yaklaşık olarak 1 ton kâğıdın geri kazanılması ile 17 ağacın kesilmesinin önüne geçilmekte ve bu işlem neticesinde ağaçtan kâğıt üretimi noktasında sarf edilen 4100 kilovat saatlik (kWh) enerjiden tasarruf sağlanmış olunmaktadır. Bu tüketim miktarı bir ailenin ortalama bir yıllık elektrik enerjisi tüketimine eş değerdir (Curi ve Kocasoy, 1982). Atık metallerin tamamına yakını geri dönüşüm tesislerinde ayrıştırılıp, tekrar kullanılmak üzere ergitme tesislerine gönderilir.

Hurda metal geri dönüşümü, cevherden metal üretmeye nispeten ekonomik oluşu ve çevreye verilen zararın daha az olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca hurda sektöründe büyük bir önceliği de taşımacılığın ekonomik ve güvenilir bir şekilde taşınması firmalara iletilmesi gerekmektedir.

Günümüz teknolojik gelişmelerine göre hurdalar sıkıştırılarak briket haline getirilmektedir. Bu sayede hem taşıma olayında daha küçük hacimde daha yüksek yoğunluklu hurdalar taşınmakta aynı zamanda daha güvenilir bir taşımacılık sağlanmaktadır. Bu kalıp işlemlerini yüksek basınçlı presler ile gerçekleştirilmektedir. Bu presler hurdanın türüne ve oluşturulacak kalıp boyutlarına göre 2 veya 3 kademeli hurda metal sıkıştırma presleri ile sağlanmaktadır. Piyasada çok değişik tasarımda ve farklı basınçlarda metal presleri mevcuttur. Şekil 1.3 de bir geri kazanım sahasında

kullanılan ve bu tasarımlardan en çok tercih edilen tür olan üstten sıkıştırma etkili bir hidrolik pres örneği ve hurda alüminyum metal atıklarının sıkıştırılması sonucu elde edilmiş alüminyum briket görülmektedir.



Şekil 1.3. a) Metal hurda pres makinası örneği (Fatihpres, 2022) b) Hurda briketi (Hekimoğlu H., 2022)

Metal ya da metal olmayan malzemeler ile bunlardan yapılmış araç-gereçlerin günlük yaşantımızın vazgeçilemez bir parçası olduğu ortadadır. Bununla birlikte ekonomik ömrünü dolduran ve artık çevre için zararlı etkiler oluşturmaya başlamış olan bu tip araç-gereçlerin imhası ya da mümkünse geri dönüştürülebilmesi dünya üzerindeki tüm ülkelerin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Geri dönüşüm faaliyetlerinden biri olan metal malzemelerin geri dönüştürülmesi aşağıda belirtilmiş olan hususlarda önemli faydalar sağlamaktadır.

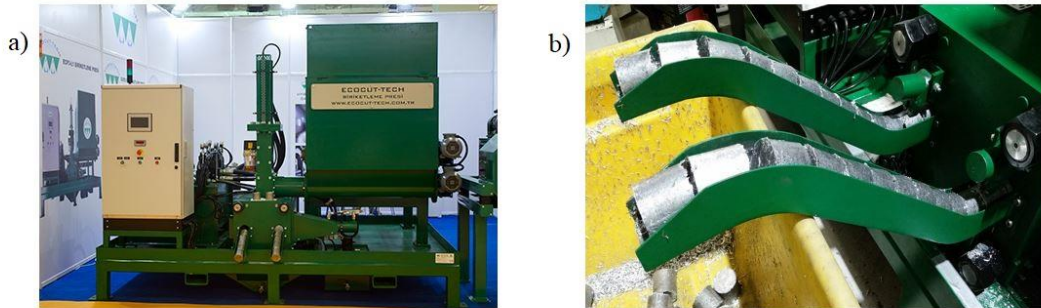
1. Toplanarak geri dönüştürülen metal malzemelerin, ülkelerin ekonomisine çok ciddi katkısı mevcuttur.
2. Metal hammadde üretimi konusunda sunmakta olduğu etkin çözümler ile sera gazı salınımının azalmasına ve küresel ısınmanın azaltılmasına fayda sağlar.
3. Cevherden metal hammadde üretiminin önüne geçildiği için doğal çevre korunmuş olur.
4. Üretim faaliyetleri esnasında tüketilen su miktarı önemli ölçüde azalır.
5. Hammadde üretimi için tüketim ihtiyacı duyulan enerji miktarı önemli ölçüde azalmış olur.

Alüminyum veya bakır gibi kıymetli metallere oranla demir madeninin doğada daha fazla bulunmasına rağmen demir cevherinden elde edilen çeliğin üretiminin zor ve pahalı oluşu, çeliğin geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılmasındaki en önemli

nedenlerden biridir. Ergitme yöntemiyle dönüştürülecek metaller elde edildiği kaynak yönüyle (cevher veya hurda) farklılık arz etmektedir. Geri dönüştürülecek metaller, kullanım ömrünü tamamlamış tüm makine elemanlarından, makinelerden, taşıtlardan, yapılardan, günlük hayatta kullandığımız ürünlerin ambalajlarından veya tasarımında kullanılmış metal malzemelerden ve talaşlı imalat atıklarından elde edilmektedir.

Metal talaşları talaşlı imalat yöntemleri ile yapılan üretim neticesinde ortaya çıkmaktadır. Talaşlı imalat prosesleri mevcut imalat yöntemlerinin içerisinde üretime katkısı yönüyle önemli bir paya sahiptir (Şeremet ve Kam, 2019; Verma vd., 2018). Yarı mamul durumundaki birçok ürün tezgâhlarda talaş kaldırılarak işlenir ve bu işlemler sonucunda mamul üretilmiş olur. Bu talaş kaldırma işlemlerinin sonucunda elde edilen metal talaşları geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilir. Bu durum, filizden hammadde üretiminin önüne geçerek hem çevre kirliliğinin azaltılması hem de ekonomik açıdan fayda sağlanması hususlarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Mamul üretimi esnasında elde edilen metal talaşları ergitme ocaklarında eritilip yeniden külçe haline getirilir. Bu külçeler kullanılacakları imalat prosesine göre hammadde olarak piyasaya sürülür. Ancak geleneksel geri dönüşüm yöntemi önemli miktardaki metal kaybı nedeniyle elverişsizdir. Birçok metal talaşının ince şekli ve geniş yüzey alanı, eriyikler yüksek sıcaklıkta kolayca buharlaşabildiğinden, erime sırasında önemli kayıplara neden olur (Shamsudin vd., 2016b). İşte bu nedenle ergitme ocağına atılacak metal talaşlarının sıkıştırılmış olması bu kayıpları nispeten azaltır.

Şekil 1.3 de geri dönüşüm sektöründe talaş sıkıştırma amacıyla makine üretimi yapan bir firmaya ait briketleme makinası ve sıkıştırma sonucu oluşan briket verilmiştir.



Şekil 1.4. Talaş Briketleme a) Briket makinesi b) Briket basımı (Ecocut, 2014)

Ergitme işlemine tabi olacak talaşlar sıkıştırılarak briket haline getirilmektedir.

Sıkıştırma işlemi ile nakliye giderleri azalmakta, hurda metal depolama alanları küçülerek imalat alanlarının genişlemesine imkân tanınmaktadır (Hassan vd., 2017; Kavak ve Şencan, 2014).

Şekil 1.3 de görsel olarak verilmiş olan Karenpro firmasına ait ECOCUT serisi briketleme cihazı teknik verileri Şekil 1.4 de verilmiştir. Talaş üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri, ECP2-XS1 modelinde 156 MPa ve ECP3-XL1 modelinde ise 352 MPa ‘dır.

Özellik / Model	ECP2-XS1	ECP2-S1	ECP3-M1	ECP3-L1	ECP3-XL1
Öngörülen Kapasite (kg/saat)					
Alüminyum	25 - 40	50 - 70	150 - 250	250 - 350	400 - 500
Çelik / Döküm	70 - 85	130 - 145	200 - 350	350 - 550	600 - 800
Mekanik Özellikler					
Motor Gücü (kW)	7.5	15	30	37	45-55
Piston Baskı Kuvveti (Ton)	44.2	78.5	99.4	122.7	176.7
Briket Çapı (mm)	60	65	60 - 70	70 - 80	80 - 100
Briket Yüksekliği (mm)	55 - 65	60 - 70	70	80	90 - 100
Briket Özgöl Ağırlığı (kg/m ³)	Alüminyum	1700 - 1900	2200 - 2400	2300 - 2400	2300 - 2400
	Çelik / Döküm	4000 - 4200	5000 - 5200	5200 - 5500	5200 - 5500

Şekil 1.5. Ecocut serisi briketleme cihazı teknik verileri (Ecocut, 2014)

1.1. Literatür

Genel olarak literatüre bakıldığında metal talaşlarının geri dönüştürülmesi ile ilgili araştırmalar briket üretimi esnasında kullanılan ekstrüzyon tekniği üzerine yoğunlaşmaktadır. Konu ile benzerliği nedeniyle toz metalurjisi alanında yapılmış sıkıştırma prosesi ile ilgili çalışmalar da araştırılmıştır. Bu çalışmalar

Günümüzde imalattan elde edilen talaşlar silindirik kalıplarda sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi tek yönde kuvvet veya zıt yönlü kuvvet çifti etkisi altında yapılmaktadır. Isıtma veya yağlama gibi kabiliyet artırıcı etmenler proses sırasında tercihen uygulanmaktadır (Canakci ve Varol, 2014).

Metal talaşını soğuk sıkıştırma, sıcak sıkıştırma ve sıcak deformasyon ile toplam üç kademe de olacak şekilde, farklı sıcaklık ve farklı sıkıştırma hızlarında sıkıştırarak elde edilen numunelerin yoğunlukları ölçüldüğünde, sıcaklığın artması talaşlar arasındaki sürtünmenin azalmasına sebep olmakta ve daha yoğun bir sıkışma meydana gelmektedir. Sıkıştırma hızının artması ise talaşların sıkışma esnasında boş alanlara yönelme süresini kısalttığından negatif bir etki oluşturmuş, sıkışma yoğunluğu düşük seviyelerde kalmıştır (Peng vd., 2009).

Sıkıştırma kabiliyetini olumsuz etkileyen en önemli parametrenin düzgün olmayan talaş geometrisi olduğu belirlenmiştir (Tekkaya vd., 2009). Talaş karışımının tek tip malzemeden oluşması sıkıştırma sonrası elde edilecek sonuçların benzer olmasını sağlar.

Sıkıştırma kalıbı içerisine dökülen talaşların farklı kimyasal yapıda olması sıkıştırma sonrası oluşacak numune yoğunluğunu önemli ölçüde etkilemektedir (Ab Kadir vd., 2017).

Metal talaşlarının yüzeyinde meydana gelen oksitlenmenin de sıkıştırma esnasında farklı katmanların birbiri ile etkin bir şekilde kenetlenmesine engel olduğu ifade edilmiştir (Shamsudin vd., 2016a).

Katı metalden daha az yoğun olan briketlerin, eriyik üzerinde henüz sıvılaşmadan beklediği durumda oksidasyona maruz kalması nedeniyle döküm kalitesi için zararlı bir etkinin olduğu belirtilmiştir (Grayson, 2017).

Düşük karbonlu çeliklerden 3-5 saat aralığında tornalama işlemiyle farklı zaman değerleri için elde ettikleri talaşları öğüttükten sonra oluşan 5-20 µm büyüklüğündeki tozları, 1100 °C’de ısıttıktan sonra preslemiş ve elde edilen numunelerin akma kabiliyetleri mukayese edilmiştir. Deney sonuçlarına göre 3. saatte elde ettikleri talaşlardan imal edilmiş tozların sıkıştırma esnasındaki akma özellikleri diğerlerine göre daha iyidir (Verma vd., 2018).

Topolskia ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ticari saflık derecesi 2 olan titanyum talaşının 350 °C derecede (yeniden kristalleşme sıcaklığı 450 °C - 600 °C) ısıtılması ve KOBO yöntemiyle ekstürize edilmesiyle elde edilen titanyum çubuklar orijinal olarak imal edilmiş titanyum çubuklar ile mukayese edilmiştir. Gerek içyapı kalitesinin gerek ise yük altındaki elastik davranışlarının benzer oluşu olumlu bir sonuç olarak bulunmuştur (Topolski vd., 2017).

Bir başka çalışmada Shahrom ve Yusoff tarafından otomobil sektöründe sıklıkla kullanılan AA6061 alüminyum malzemeden elde edilen talaşlar alüminyumun erime sıcaklığı olan 650°C ‘in altında yaklaşık 550 °C’de iki saat kadar ısıtıldıktan sonra sıcak dövme yöntemiyle 55 MPa ve 165 MPa gerilme değerleri arasında sıkıştırılmıştır. Mukayese amaçlı olarak talaş malzeme ısıtma olmaksızın yine aynı yük değerlerinde sıkıştırılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen numuneler mukayese edildiğinde ısıtma olmaksızın yapılan sıkıştırma işlemine göre ısıtma yapılarak

uygulanan sıkıştırma %12,1 'e varan yoğunluk artışı tespit edilmiştir (Shahrom ve Yusoff, 2017).

Bir genel gözden geçirme çalışmasında, araştırmacılar alüminyum malzemenin sıcak ekstrüzyonunda 450 °C 'lık sıcaklık değerini kullandığını ancak dikkatli bakıldığında uygulanabilecek başka sıcaklık değerlerinin de olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ekstrüzyon işlemini etkileyen ön ısıtma sıcaklığı ve ön ısıtma zamanı gibi parametrelerin bu işlemin kalitesinin artırılması için fikir verebilecek yegane değerler olmadığını, bunlara ilave olarak malzemenin optimum sürücü hızı ile uyumlu mukavemet değerlerinin de incelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Ab Rahim vd., 2015).

Abbas ve arkadaşları tarafından AA 6061 işleme talaşlarının üç farklı talaş uzunluğuyla sıkıştırma işlemi incelenmiştir. Sıkıştırma testleri ve sıkıştırma sırasında talaşların ve sıkıştırma sonrası sıkıştırılmış disklerin mekanik davranışını anlamak için yükleme ve boşaltma ile tek eksenli sıkıştırma testleri yapmışlardır. Test sonuçları yarı-statik yükleme hızının sıkıştırma sırasında talaşların mekanik davranışı üzerinde küçük bir etkisi olduğunu göstermektedir. Poisson oranı, Young modülü ve akış gerilmesi, sıkıştırma ve tek eksenli sıkıştırma testlerinden elde edilmiş olup, göreceli yoğunluğa bağlı olduğu tespit edilmiştir (Abbas vd., 2017).

Baffari ve arkadaşları akış odaklı spektral kaos metodunu (FSC) sac hurdalarının geri dönüşümünü yönlendirmek için kullanılmıştır. AA1050 talaşlarını 1020 °C ta H13 sıcak iş takım çeliğinden yapılmış 52 HRC sertlikteki kalıp içerisinde ekstrüze etmişlerdir. Elde edilen kütükler, karıştırılan cephenin bölmedeki yavaş ilerlemesi nedeniyle üniform olmayan bir morfoloji ve mekanik direnç sağlamıştır. Etkili bir şekilde işlenmekte olan malzemenin kapsamı zamanla artar, ancak bu nedenle yapılandırılmış sac parçalardan oluşan kütüğün dibine ulaşmaz. Bununla birlikte, uygun şekilde konsolide edilen malzeme, geri dönüştürülen ana malzemeye karşılaştırılabilir mekanik özellikler sunar. İşlem etkinliğini artırmak için, işlem süresini kısaltan ve işlenen alanı genişleten stratejiler uygulanmalıdır (Baffari vd., 2019).

Cooper ve arkadaşları AA6060 alüminyum alaşımı üzerine yapmış oldukları çalışmada, ekstrüzyonun talaş geri dönüşümü sırasında metal geri kazanımını arttırmayı amaçlayan bir ön ısıtma işlemi kullanımını araştırmıştır. Ekstrüzyon sırasında oksidasyon ölçülmüş, alüminyum ve çinko işleme talaşlarının eritilmesi

sırasında metal geri kazanımı, alternatif geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak elde edilebilecek şekilde karşılaştırılmıştır. Alüminyum talaşların sıcak ekstrüzyonu (200 °C), ihmal edilebilir metal oksidasyonu ile sonuçlanmıştır. Ekstrüze alüminyum talaşlarının daha sonra eritilmesi sırasında metal geri kazanımının, dökme metal eritmeye eşit olduğu görülmüştür (% 95 'in üzerinde metal geri kazanımı). Daha sonra, ekstrüzyon ve daha sonra alüminyum talaşların eritilmesinden oluşan yeni bir işlem yolunun kullanılması, birincil enerjide önemli tasarruflar ve sera gazı emisyonlarının önlenmesiyle sonuçlanmıştır. Çinko talaşlarının ekstrüzyonunun zayıf bir şekilde kaynaşmış, gözenekli bir çubuk ve müteakip erime sırasında önemsiz metal geri kazanımı ile sonuçlandığı bulunmuştur (Cooper vd., 2018).

Fullenwider ve arkadaşları, 304 L tipi paslanmaz çelik malzeme talaşları ile metal katkı maddesi üretimi amaçlı çalışmalarında küresel ezici kullanarak 60 saatlik öğütme işlemi yapmışlardır. Bunun sonucunda elde ettikleri 304 L tozunu metal işleme yöntemleriyle oluşmuş talaş örnekleriyle sertlik hususunda mukayese etmişlerdir. Ve üretilen tozun sertlik değerinin talaşın sertlik değerine göre %30 mertebesinde artış gösterdiği ortaya konmuştur (Fullenwider vd., 2019).

Gustafsson ve arkadaşları çok partiküllü sonlu element metodu (MPFEM) ile demir cevheri topaklarının sınırlı sıkıştırılmasını simule etmek için kullanmışlardır. Topakların boyut, şekil ve malzeme özelliklerinde istatistiksel değişiklikleri göz önünde bulundurmuşlardır. Model tarafından öngörülen kırılmış demir cevheri topağı sayısı, demir cevheri topaklarının fiili kapalı sıkıştırma testlerinden elde edilen sayısı ile oldukça yakın tutulmuştur. Partiküllerin sonlu eleman (FE) modeli ile tek tek incelenmesi, doğru yük-yer değiştirme davranışını tam olarak tanımlamada hassas olmayan neticeler vermiştir. MPFEM modelinin, tek eksenli sınırlı sıkıştırmada demir cevheri topaklarının kırılma oranını çoğaltabildiğini ve demir cevheri topaklarının sanal kırılma deneyleri için uygun bir yöntem olduğunu göstermişlerdir (Gustafsson vd., 2013).

Güner ve arkadaşları, soğuk toz sıkıştırma işleminin 3-D sonlu eleman modellenmesini Cam-Clay, Shima-Oyane, Mohr-Coulomb ve Von Mises gibi farklı malzeme modelleri ve modelleme yaklaşımları ile analiz etmişlerdir. Çalışmada sürtünme katsayısının sonuçlara etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar gerilme dağılımının uygulanan malzeme modeline ve uygulanan modelleme yaklaşımına göre değiştiğini göstermiştir. Çok parçalı sonlu elemanlar yöntemi (MPFEM) ve sürekli

yaklaşımlar arasındaki farkların sonuçlar üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. Yeniden düzenleme işlemi sırasında partiküller hiç deforme olmamıştır, uygulamada tecrübe edildiği gibi çok parçacıklı sonlu elemanlar (MPFE) modellemesi için etkilidir, gerilme ise süreklilik modellemesi yaklaşımında sürekli olarak artma eğilimindedir. Sonuç olarak Von Mises kriteri esas alınarak yapılan MPFE analizi, test edilen kombinasyonlar arasında en uygun analiz kombinasyonu olarak kabul edilmiştir. Ayrıca süreklilik analizi için Mohr – Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modellerinin daha uygun olacağı bulunmuştur (Güner vd., 2015).

Jerier ve arkadaşları, yerel katı fraksiyonu temsil eden yeni bir parametrenin eklenmesiyle, plastik sıkıştırılamazlığın küre ambalajına etkilerinin ayrık eleman yöntemi (DEM) çerçevesinde modellenebildiğini ve bunun da yüksek yoğunluklu etkilerin tanımlanmasına izin verdiğini ortaya koymuşlardır. Aslında bu yaklaşım, izostatik sıkıştırma için deneysel sonucun tamamen çoğaltılmasının mümkün olduğunu göstermiştir (Jerier vd., 2011).

Kang ve arkadaşları, Shima ve Oyaneus'un sünme fonksiyonunu kullanarak yaptıkları sonlu elemanlar hesaplamaların, soğuk kademeli sıkıştırma altındaki demir tozu için deneysel verilerle oldukça iyi uyuştuğunu ortaya koymuşlardır. Merkezleme flanşı ve demir tozu kompakt arasındaki temas yüzeyinin iç köşesinde en yüksek ve demir tozu kompaktının dış orta bölgesinde en düşük nispi yoğunluk görülmüştür. Ayrıca, radyal doğrultuda iç ve dış yüzey arasındaki nispi yoğunluk farkı, kovanın radyal yer değiştirmesi büyüdükçe artmıştır. Hidrostatik basınç ve Von Mises gerilme dağılımlarının köşeler hariç numune boyunca neredeyse aynı olduğu ortaya konmuştur (Kang vd., 2007).

Narvan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada nano kompozit diskleri, yeni bir kesme sıkıştırma yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Magnezyum tozlarını silindirik bir kalıbın en üst seviyesinden daha alt seviyelere kadar, kalıbın kalan kısmını ise SiC ile kalıp üst yüzeyine kadar doldurduktan sonra dairesel yönde 500 dev/dk ile kendi etrafında dönen bir erkek kalıp vasıtasıyla bu toz tabakalarını sıkıştırmışlardır. Sonuç olarak salt magnezyumdan oluşan sıkıştırılmış toz yapının mikrosertliği 25 HRV düzeyinde iken SiC katılarak sıkıştırılan yapının mikrosertliğinin 80 HRV olacak şekilde artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca SiC katılan sertleştirilmiş yapının yüzey kalitesi diğerine göre oldukça iyileşme göstermiştir (Narvan vd., 2016).

Tang ve Reynolds, sürtünmeli ekstrüzyon yöntemi ile AA2050 ve AA2195 alüminyum alaşım talaşı karışımını ekstrüze ederek birleştirilmiş tel üretmişlerdir. Üretim esnasında uyguladıkları sıcaklık düşük seviyelerde ise tel malzemede soğuk yırtılma, yüksek ise sıcak kırılma meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda pres kuvvetinin artmasıyla birlikte telin mikro yapısı incelendiğinde tanelerin büyüdüğü de görülmüştür. Tel malzemesinin uygun değerlerdeki eğilme sünekliğine ortalama kalıp dönme oranlarında ulaştığı ayrıca gözlemlenmiştir (Tang ve Reynolds, 2010).

Gülüzade, AlMg1SiCu alüminyum alaşımı ve AISI 1040 çelik talaşlarının farklı kompozisyonlarından briket üretimini toz metalurjisi metodu ile yapmıştır. Çelik talaşlarını takviye malzemesi, alüminyum ise matris malzeme olarak kullanmıştır. Bu farklı kompozisyonlara AISI 1040 çeliğini %20, %30 ve %40 oranlarında ilave etmiştir. Bu çalışmada üretilmiş olan kompozit malzemelerin üretimi esnasında, talaşların granülüzasyonu, soğuk presleme (200 MPa basınç altında), kalıp iç yüzeyinin yağlanması amacıyla çinko sterat kullanımı, 650 °C’de koruma gazı altında bekletme ve vakum olmadan oksidasyon önlemek için geliştirilen yeni sinterleme metodu gibi proseslerden geçirilmiştir. En yüksek yüzey sertliğinin %40 oranında AISI 1040 talaşı takviye edilen kompozit numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Eğilme deneyleri sonucunda elde edilen grafiklerde AISI 1040 oranının azalmasıyla birlikte, numunelerin eğilmeye karşı gösterdiği direncin artış gösterdiği ispat edilmiştir (Gülüzade, 2011).

Wan ve arkadaşları, katı haldeki alüminyum talaşlarının soğuk presleme yöntemiyle ekstrüze edilmesi üzerine bir gözden geçirme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada ekstrüzyon oranının yanında kütük sıcaklığı, geçiş sayısı (CEC), sinterleme döngüsü (SPS) ve diğerleri gibi işlem parametrelerini de optimize etmişlerdir. Talaş birleşiminin daha iyi sağlanabilmesi için akış yolunun dolayısıyla kalıbın yeniden tasarlanmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Sıcak ekstrüzyon sırasında daha iyi talaş bağlaması elde etmek için kullanılan delik kalıbı gibi diğer katı hal geri dönüşüm yöntemleri için orijinal kalıp geometrisi, yeni deformasyon yolunu yeniden tasarlanarak uygun ayar yapılabileceğini ortaya koymuşlardır (Wan vd., 2017).

Wang ve arkadaşları, ADC12 adı verilen ve Al-Cu-Si-Fe alaşımından imal edilmiş malzemeden tornalama işlemi neticesinde elde edilmiş talaşların katı hal geri dönüşümünü araştırmışlardır. 623 K’de ön ısıtma işlemi uygulanmış talaşları, ön

ısıtma uygulanmamış talaşlar ile mukayese etmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda, sıkıştırma öncesi ön ısıtma uygulanmış talaşlarda 130 MPa'lık akma gerilmesi, 305 MPa'lık kopma gerilmesi ve kopma uzamasında %11,8'lik artış olduğu sonucuna varmışlardır. Böylece mekanik özelliklerin malzeme içerisinde çözünen karbon miktarı ile orantılı olduğunu tespit etmişlerdir (Wang vd., 2019).

Zhang ve arkadaşları, AA6061 alüminyum alaşımından elde edilmiş talaşların sürtünmeli ekstrüzyonunu FEM ile modellemiş, işlem sırasında oluşan akış yönünü pratik uygulamalar ile mukayese etmişlerdir. FLUENT programında tasarlanan ekstrüzyon sırasında, AA6061, viskozitesi sıcaklık ve gerilme oranına bağlı olan Newton olmayan bir sıvı olarak modellenmiştir. Akışkanlar dinamiği teorilerini bilgisayarla bütünleştirerek, bilgisayarlı akış yönteminden (CFD) elde edilen akış yönünün pratik uygulamalarda elde edilenler ile benzer olduğunu tespit etmişlerdir (Zhang vd., 2014).

Zhang ve arkadaşları, yapmış oldukları bir diğer çalışmada AA6061 ve AA2195 alüminyum alaşımlarından oluşan karışımın sıcak ekstrüzyon yöntemi ile ekstrüze edilmesini FLUENT programında modellemişlerdir. Buna göre malzeme akışı, prosesin saf termal modellerinden gelen sıcaklık tahminleri için sağlam bir temel oluşturan sıcaklık alanının öngörüsü üzerinde küçük bir etkiye sahiptir. Akış alanı değişkenleri, yani hız, gerilme hızı ve viskozite, ekstrüzyonun başlamasından sonra uzamsal dağılımlarını korur, ancak sıcaklık alanı zamanla büyük bir değişiklik göstermiştir (Zhang vd., 2018).

Adinamis ve arkadaşları Ms62 malzeme kullanarak, artan kesme hızının, ilerleme hızının, talaş derinliğinin kilit üretkenlik ve takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, talaş oluşumu ve güç gibi faktörlerin parça kalitesi göstergeleri üzerindeki etkilerini ölçmek için karbür takımlar kullanılarak bir dizi tek noktalı tornalama, delme ve çevresel frezeleme testleri gerçekleştirildi. Buna göre pirincin 12L14 ve 304L çeliklerinden çok daha yüksek hızlarda ve önemli ölçüde daha uzun takım ömrüyle işlenebileceği ortaya konmuştur. Ek olarak, pirinçler için güç gereksinimleri önemli ölçüde daha azdır. (Adinamis vd., 2019).

Toufatzis ve arkadaşları tarafından üç kurşunsuz pirinç alaşımının, CuZn42 (CW510L), CuZn38As (CW511L) ve CuZn36'nın (C27450) tornalama modundaki işlenebilirliği, kalite özelliklerine göre bir kurşunlu pirinç türü olan CuZn39Pb3

(CW614N) ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü esas alınarak mukayese edildi. Kesme kuvveti aşağıdaki koşullar kullanılarak optimize edilmiştir. Bunlar; optimum alaşım tipi CW614N, kesme hızı = 2250 rpm, kesme derinliği = 0,5 mm ve ilerleme hızı = 150 mm/dak'dır. ANOVA, yukarıdaki faktörlerin katkılarının sırasıyla %11.13, %3.57, %64.40 ve %20.47 olduğunu göstermiştir. Veri araçları ve S/N yanıt tablolarından gelen analizler, kesme kuvveti ölçümlerinin belirlenmesinde talaş derinliğinin en etkili faktör olduğunu gösterirken, ANOVA bu parametrenin en yüksek yüzde katkıya sahip olduğunu ($P_p = \%64,40$) ve dolayısıyla en etkili rolü oynadığını kanıtlamıştır. Ayrıca ANOVA analizine katkı yüzdesi %50'den düşük olduğu için herhangi bir deneyin tekrarına gerek yoktur (Toufatzis vd., 2018).

Rawal ve Gangrade, iş mili hızı (rpm), ilerleme hızı, talaş derinliği, talaş kaldırma oranı, yeterli soğutma sıvısı akışı, takım geometrisi, iş parçası bağlama gibi girdi parametrelerinin en iyi kombinasyonları ile yüksek hızlı tornalama ile üretilen bir parçanın yüzey karakterizasyonunun sonuçları, malzeme bileşimi, talaş oluşumları ve buna karşılık gelen çıktı boyutu hassasiyeti, dairesellik ve daha iyi yüzey kalitesini araştırmıştır. Çalışmadaki işleme parametrelerinin önemi, numuneler üzerinde bir dizi işleme testi ile belirlenmiş ve denemeler için Taguchi tekniği (ortogonal dizi) uygulanmıştır. Mümkün olan en iyi kesme parametreleri kombinasyonu kullanılarak bir doğrulama testi gerçekleştirildi. Buna göre C27450 için optimum sonuç: mil hızı 660 rpm, ilerleme hızı 0,012 mm/dev ve kesme derinliği 1,0 mm 'dir (Rawal ve Gangrade, 2022).

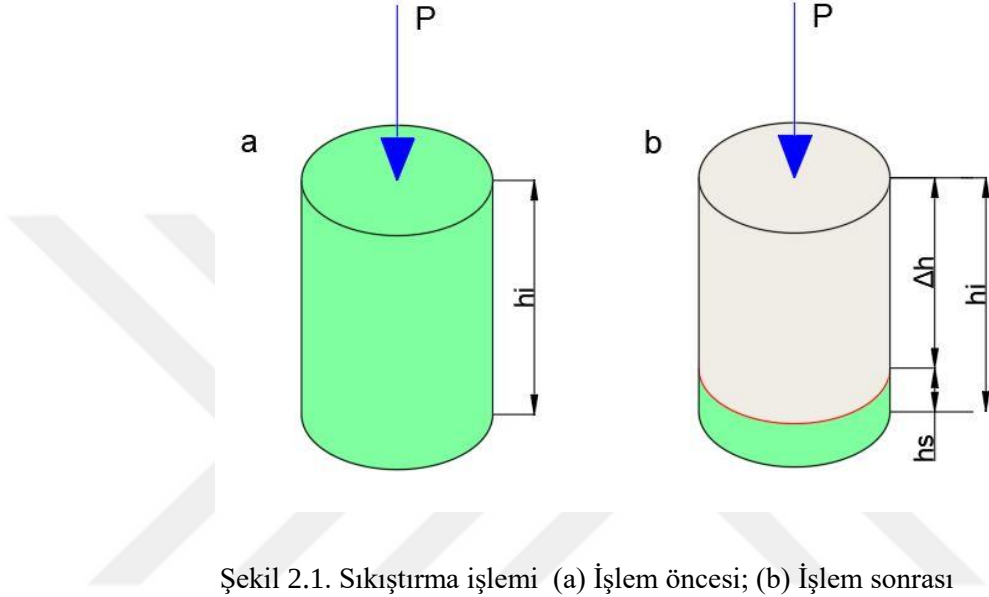
1.2. Özgün Değer

Literatür incelemesinde kalıp geometrisine bağlı olarak alüminyum ve çelik talaşlarının sıkışma yoğunluklarındaki değişimin incelendiği araştırmalara rastlanılmamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, talaşlı imalat sektöründe işlenen metallerin içerisinde kullanım miktarı en fazla olan AISI 1040 çeliği, AA7075 alüminyum alaşımı ve Ms62 pirinç talaşlarının farklı geometrili kalıplarda sıkıştırılması araştırılmıştır. AISI 1040 çeliği otomotiv endüstrisinin birçok alanında, kaplin, krank milleri ve sıkı geçmeli bağlantıların da kullanılmaktadır (Agrawal ve Mukhopadhyay, 2022). 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında yüksek mukavemet, yorulma direnci ve tokluk, düşük süneklik ve yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı daha çok havacılık endüstrisi olmak üzere endüstriyel

faaliyetlerin birçok alanında hammadde olarak önemli ölçüde kullanılmaktadır (Heinz vd., 2000; Rendigs, 1997; Williams ve Starke Jr, 2003). Pirinç alaşımları, mükemmel işlenebilirlik, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, iyi mukavemet, süneklik ve korozyon direnci, manyetizma olmaması ve yüksek hurda değeri gibi malzeme özelliklerinin benzersiz bir kombinasyonunu sunar. Pirinçler bu nedenle sıhhi tesisat, otomotiv, makine, elektrik ve elektronik, havacılık ve tıp dahil olmak üzere çok sayıda endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Adinamis vd., 2019). AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşlarının sıkışma anındaki gerilme değerleri ve sıkıştırma sonrası yoğunluğu araştırılmıştır. Yoğunluk değerleri, Taguchi metodu ile oluşturulan deney tasarımına göre ve 3 defa tekrar edilerek doğrulanmış deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Anova varyans analizi ile önceden belirlenmiş faktörlerin sonuç üzerindeki etkisi bulunmuştur. Regresyon yapılarak farklı kalıplarda en yoğun sıkışmanın meydana gelebileceği kuvvet denklemleri elde edilmiştir. Ayrıca gerilme değerlerinin büyüklüğü, sonlu eleman metodu ve matematiksel metotlar ile mühendislik yaklaşımı oluşturularak incelenmiştir. Deneysel sonuçların sonlu eleman metoduyla doğrulanması yapılan bilimsel çalışmaların etkisini arttırmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Genel olarak sıkıştırma işlemi, bir malzemenin belirli bir yük altında ezilerek ilk hacmine göre daha düşük bir hacme indirgenmesidir. Şekil 2.1 a ve b de görüldüğü gibi ilk yüksekliği h_i olan metal talaşı P basıncının etkisi altında Δh kadar sıkıştırıldığında son yükseklik değeri h_s olur.



Şekil 2.1. Sıkıştırma işlemi (a) İşlem öncesi; (b) İşlem sonrası

Talaşa meydana gelen sıkışma aslında plastik bir deformasyon değildir. Talaş akma gerilesinin altında kalan çok düşük seviyeli gerilmelerde dahi kolaylıkla kalıpta şekil alabilir. Bunun temel sebebi sıkıştırma işleminde plastik deformasyondan ziyade mekanik olarak gelişen kenetlenme durumudur. Talaş plakaları üst üste yığılı vaziyette sıkıştırıldıklarından plakalar arası etkileşim mevcuttur. Sıkışma anında her talaşa ait çıkıntılı veya engel içeren keskin yüzeyler bir başka talaştaki boşluğa girer ve baskı kuvvetinin etkisiyle kenetlenme tamamlanır. Dolayısıyla uygulama esnasında küçük kuvvetlerin kullanılması yeterlidir. Bu çalışmada gerilme değerlerindeki mukayese sonlu elemanlar metodu ve matematiksel metot ile ortaya konmuştur. Deneysel çalışmada ise farklı kalıp geometrilerinde sıkıştırma sonucunda elde edilen numunelerin yoğunlukları mukayese edilmiştir. Çekme-basma test cihazından elde edilen anlık ilerleme ve gerilme değerleri bu mukayese yapılırken kullanılan verileri oluşturmaktadır. Çalışmanın tamamında AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşları için akma gerilmesi altındaki yükler ile hesaplama yapılmıştır.

2.1. Deney Tasarımı

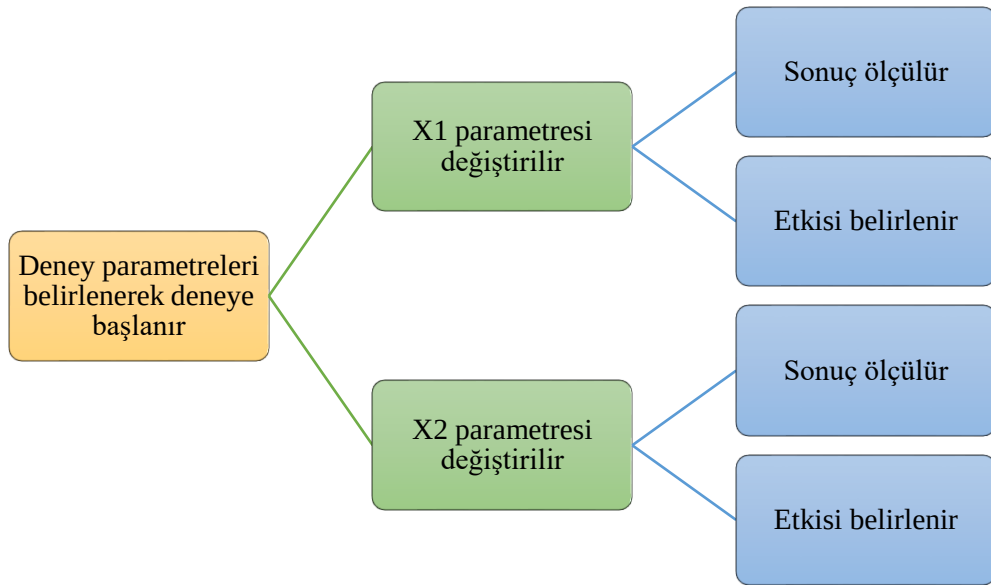
Bilimsel çalışmalarda deney tasarımı kullanmak sadece istatistiksel bir yaklaşım olarak düşünülmemelidir. AR-GE faaliyetlerinde kaliteyi artıran, üretim maliyetlerini azaltan, diğer kalite süreçlerini destekleyen ve tamamlayan metotlardır. AR-Ge amaçlı yapılan deneysel çalışmalarda kalitenin artırılması, kaynakların daha etkin ve verimli kullanılması, deney süreçlerinin kısaltılarak araştırma ve geliştirme süreçlerinin hızlanmasına olumlu katkı sağlamaktadır. Ayrıca ürünün veya prosesin kalite niteliklerini belirleyen değerlerin, kontrol edilmesi zor faktörlere karşı daha az duyarlı olunması gibi faydalar sağladığı bilinmektedir (Savaşkan vd., 2010). Deney tasarımında en temel aşama faktör ve seviyelerinin belirlenmesidir. Faktör, yapılacak olan deneyi etkilediği varsayılan durumdur. Sıcaklık, gürültü, sürtünme katsayısı vb. Seviye ise her bir faktörün deney içinde uygulanacak büyüklük kademeleridir. Örneğin kuvvet faktörü için en alt seviyenin 5500 kgf en üst kademenin ise 7500 kgf olarak belirlenmesi gibi. Alt ve üst seviyeler arasına istenilen durumda başka seviyeler de eklenebilir.

Deney tasarımının 2 farklı şekilde yapılması mümkündür. Bunlar,

1. Klasik metot
2. İstatiksel metot

2.1.1. Klasik Metot İle Deney Tasarımı

Bu yöntemde her deney aşamasında bir parametre değiştirilirken diğer parametreler sabit tutulur ve sonuç üzerindeki etkisi belirlenir. Tüm parametreler için seviye sayısına bağlı olarak yapılacak deney sayısı da belirlenmiş olur. Bu metot ile yapılan tasarımda çalışmaya başlama, her bir parametre için bir başlama noktası ya da temel seviye seçimidir. Seçilen parametre haricindeki diğer parametreler kendilerine ait başlangıç seviyelerinde sabit tutulur. Seçilen parametreler kendi büyüklük veya tanım aralıkları içerisinde değiştirilerek deneye etkileri araştırılır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Metot ile ilgili çözüm yaklaşımı Şekil 2.2 de belirtilmiştir. Buna göre deneyin sonucunu etkilediği düşünülen X1 ve X2 parametrelerinden herhangi biri değiştirilir. Sonuç ölçülür ve etkisi belirlenir. Bir sonraki aşamada aynı faktör için farklı seviye ya da farklı faktör ve onun seviyeleri değiştirilerek deneysel çalışmalar sürdürülür. Klasik yöntem ile yapılan deney çalışmalarında deneyi etkileyebilecek kontrolü mümkün olmayan dış faktörler çok fazla hesaba katılmaz.



Şekil 2.2. Klasik metot ile yapılan deneylerde ilerleme aşamaları

Ayrıca bu metot faktörlerin 5’den daha çok seviyesinin olabilmesini mümkün kılmamaktadır. Örneğin 4 faktörlü bir çalışmada her bir faktörün 5 seviyesinin olduğu düşünülürse toplamda $5^4 = 625$ farklı kombinasyon denenmelidir. Şayet deneysel bulgulardaki hataların minimal seviyelere düşürülmesi için tekrar deneylerinin de yapıldığı varsayıldığında bu sayı $3 \times 625 = 1875$ değerine ulaşır. Bu sayısal değerlerden de anlaşıldığı gibi klasik metot ile deney çözümü oldukça zor ve maliyetlidir.

2.1.2. İstatiksel Metot İle Deney Tasarımı

Klasik deney tasarımlarının tersine istatistiksel deney tasarım metotları ile daha az maliyet ve deney sayısı ile daha etkili sonuçlar elde etmek mümkündür (Özden, 2020).

İstatiksel deney tasarımlarında geleneksel klasik yöntemine göre süreci uzatan deney kombinasyonları en aza indirildiğinden deneysel çalışma süresi, maliyeti ve hatalı veri sayısı gibi önemli durumlarda büyük iyileşmeler sağlanmıştır. Bir istatistiksel deney tasarımında birbirinden farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler;

1. Tam faktöriyel
2. Kesirli faktöriyel
3. Taguchi metodu

2.1.2.1. Tam Faktöriyel Metot İle Tasarım

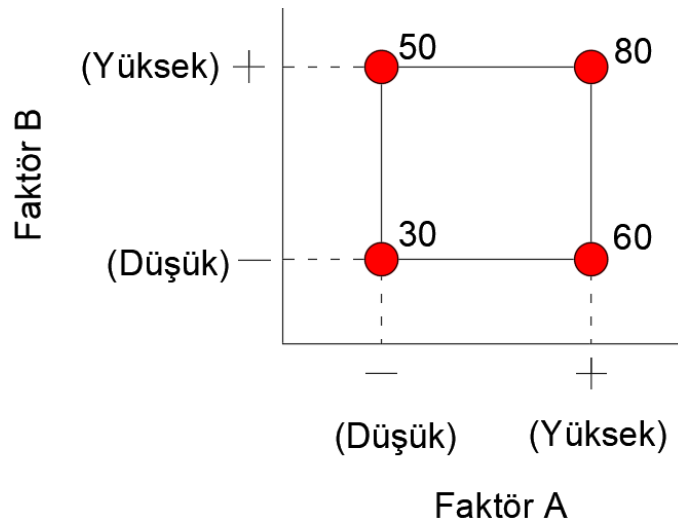
Seçilen bir faktör seviyesinde tüm mümkün kombinasyonları kullanılarak ölçüldüğü bir deney tam faktöriyel tasarım olarak adlandırılır. Yanıtın faktör seviyesine bağlı olup olmadığının test edildiği deneylerde, klasik tasarım yerine faktöriyel tasarım kullanılmasının iki temel nedeni vardır:

1. Faktöriyel deneyler, etkileşmeleri saptayarak hesaplama yapılmasını sağlar. Her seferinde bir şekilde tasarlanmış deneyler bu konuda yetersiz kalırlar.
2. Eğer faktörlerin etkisi toplanabilir ise, bu durumda aynı duyarlılığı elde etmek için faktöriyel tasarım klasik yaklaşımdan daha az sayıda ölçüme ihtiyaç duyar.

Sonuç değişkeninin değişimi sistemi etkileyen faktörlere bağlıdır. Eğer sonuç değerindeki değişim bir faktörün seviyesinde değişiklik oluşturuyorsa sonuç değeri üzerinde bu faktörün etkisine ana ya da temel etki adı verilir.

Toplam 2 faktör içeren tam faktöriyel bir denet tasarımında her faktör için seviye sayısını 2 olarak kabul edersek, bu seviyelerin düşük olanı “-” ile yüksek olanı ise “+” sembolü ile gösterilir. İki seviyeli olarak düşünülen bu tasarımda, A faktörünün sonuç üzerindeki ana etkisi, yüksek ve düşük seviyelerin ortalaması arasındaki farka eşit olmaktadır (Karşlıoğlu, 2013).

Bu durum bir örnek üzerinden daha net anlaşılacaktır. Şekil 2.3 de A ve B faktörlerinin en yüksek ve en düşük değerleri verilmiştir.



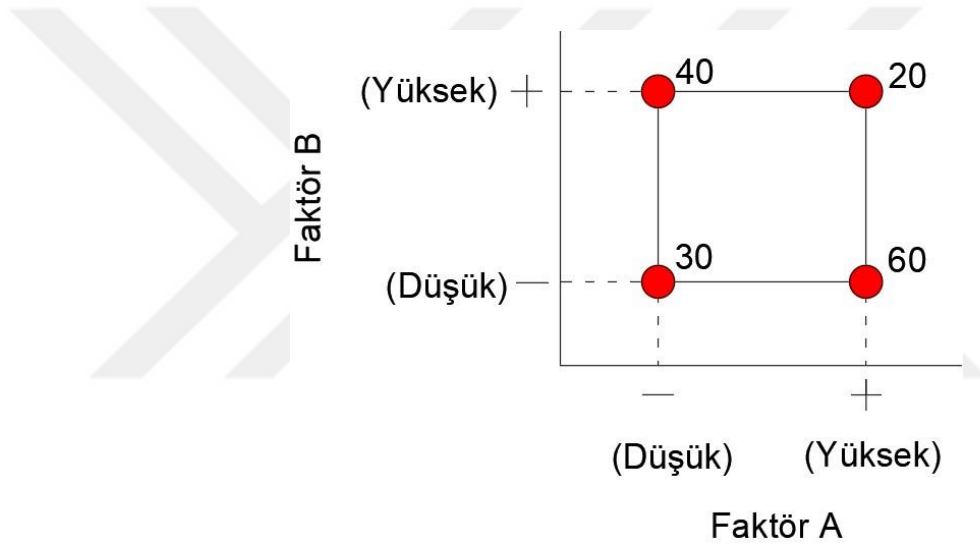
Şekil 2.3. Sonuç değişkeni köşelerde gösterilmiş faktöriyel deney

$$A = \frac{80 + 60}{2} - \frac{50 + 30}{2} = 30$$

A faktörünün düşük seviyesi ile yüksek seviyesi arasındaki ortalama sonuç değişkeni artışı 30 olur. Aynı yöntem ile B faktörünün etkisi aşağıdaki gibi bulunabilir (Montgomery, 2017).

$$B = \frac{80 + 50}{2} - \frac{60 + 30}{2} = 20$$

Birtakım deneylerde sonuç değişkeni, bir faktörün seviyeleri ve diğer faktörlerin seviyeleri arasında farklılıklar meydana gelebilir. Böyle bir durumda faktörler arasında etkileşimin varlığından bahsetmek mümkündür. Şekil 2.4 de yukarıda anlatılan durum resmedilmiştir.

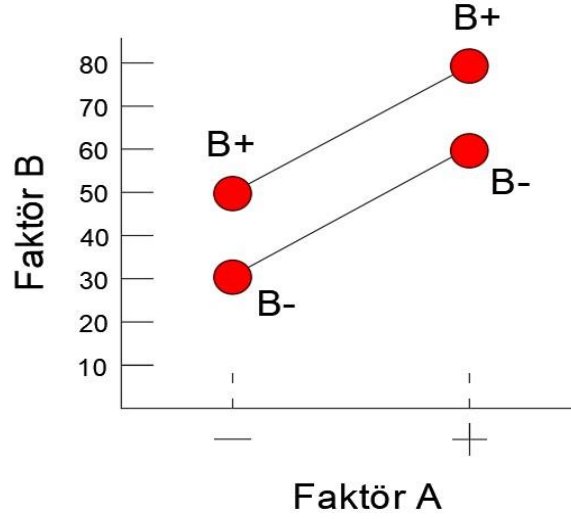


Şekil 2.4. Etkileşimler ile gösterilmiş faktörlü faktöriyel deney

B faktörünün düşük seviyesinde A faktörünün etkisi; $A = 60 - 30 = 30$

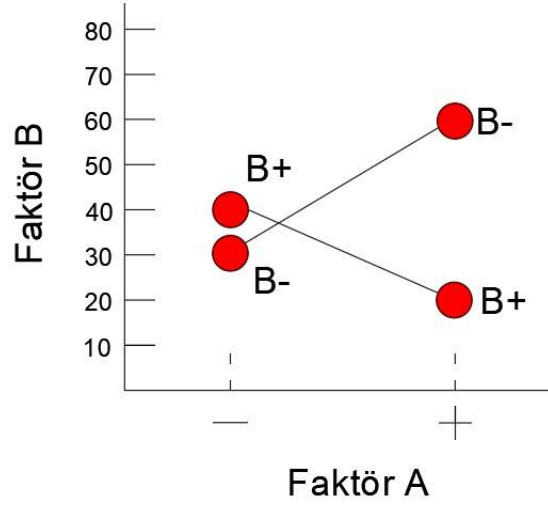
B faktörünün yüksek seviyesinde A faktörünün etkisi; $A = 20 - 40 = -20$

Bunun temel sebebi, A'nın etkisi hesaplanırken B'nin düşük ve yüksek seviyelerinin hangisinin seçildiğidir. Seçilen B büyüklüğüne göre A değerinin de büyüklüğü değişmektedir. Bu değişim deney sonuçlarındaki farklılığın temel sebeplerinden biridir.



Şekil 2.5. Etkileşimsiz A Faktöriyel Deneyi

Şekil 2-5 ‘de verilen grafikte B faktörünün hem “-“ hem de “+” durumları için A faktörünün durumu verilmiştir. Şekilde B^- ve B^+ faktörlerinin her ikisi içinde çizginin paralel olduğu yani A ve B faktörleri arasında etkileşimin olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Etkileşimli Faktöriyel Deneyi

Şekil 2-6 ‘da B^- ve B^+ değerleri arasında çizilmiş olan faktör çizgilerinin paralel olmadığı ve birbirlerini bir noktada kestiği görülmektedir. Bu durumda A ve B faktörü arasında etkileşimin varlığında söz etmek mümkündür.

Regresyon model oluşturularak faktörler arasındaki etkileşimleri göstermek mümkündür. Tasarımda kullanılacak tüm faktörlerin seviyelerinin sayısal büyüklükler olduğunu kabul ettiğimiz bir tasarımda, iki faktörlü tam faktöriyel bir deneyin

regresyon modeli aşağıda belirtildiği gibidir (Karşlıoğlu, 2013).

y: Sonuç değişkeni

β_0 : A ve B faktörlerinin etki büyüklüklerinin ortalaması

β_1 : A faktörünün etki büyüklüğünün yarısı

x_1 : A faktörünü sembolize eden değişken

β_2 : B faktörü etki büyüklüğünün yarısı

x_2 : B faktörünü sembolize eden değişken

β_{12} : AB etkileşiminin etki büyüklüğünün yarısı

x_1x_2 : x_1 ve x_2 arasında oluşan etkileşim değeri

ε : Rassal hata terimi

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (2.1)$$

2 seviyeli ve 3 seviyeli olduğu düşünülen ve toplam iki faktörden oluşan bir deneyde regresyon modeli aşağıdaki gibi olur.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_2^2 + \beta_4x_1x_2 + \beta_5x_1x_2^2 + \varepsilon \quad (2.2)$$

Ana etkilerEtkileşimler

Toplam 3 faktör ve bu faktörlere ait ikişer seviyeden oluşan bir deneyin regresyon modeli aşağıda belirtilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_1x_2 + \beta_5x_1x_3 + \beta_6x_2x_3 + \beta_7x_1x_2x_3 + \varepsilon \quad (2.3)$$

Ana Etkilerİki yönlü EtkileşimlerÜç yönlü Etkileşimler

Birçok analitik teknikte kullanılan ölçüm sisteminin verdiği yanıt kullanıcının kontrolü altında olan bir dizi deneysel faktöre bağlıdır. En uygun faktör seviyesinin belirlendiği sürece optimizasyon adı verilir.

2.1.2.2. Kesirli Faktöriyel Metot İle Tasarım

Tam faktöriyel deney tasarımında deney sayısı belirlenirken klasik metoda benzer bir durum söz konusudur. Toplam deney sayısı faktör sayısı seviye sayısının üstü olarak alınır. Örneğin, 2 seviyeli 5 faktörlü bir tasarımda deney sayısı $2^5 = 32$

olarak bulunur. Kesirli faktöriyel tasarımda ise tasarım için hesap yöntemiyle seçilecek olan 1/2, 1/4 ya da 1/8 oranlarından uygun olana göre tasarım sayısını azaltmak mümkündür.

Toplam yedi faktör ve her bir faktör için 2 seviye içeren bir deney tasarımında yapılması gereken toplam deney sayısı aşağıdaki gibidir.

$n = 2.2.2.2.2.2.2 = 2^7 = 128$ 'dir. Bu durumda $n-1 = 127$ farklı etki hesaplanabilmektedir. Toplam 127 etkinin 7 adedini ana (temel) etkiler, kalan 120 adedini ise oluşan etkileşimler meydana getirmektedir (Karşlıoğlu, 2013).

Faktörler arasında meydana gelebilecek olan etkileşimlerin sayısının hesaplanmasında kullanılacak binom katsayısı formülü aşağıda denklem 2.4 de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} n \\ k \end{bmatrix} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (2.4)$$

Tablo 2.1. 2^7 deney sayılı tam eşleştirmeli bir deneyde ana ve etkileşim etkileri

Kaynağı	Adet
2'li	$\binom{7}{2} = \frac{7!}{(2! 5!)} = 21$
3'lü	$\binom{7}{3} = \frac{7!}{(3! 4!)} = 35$
4'lü	$\binom{7}{4} = \frac{7!}{(4! 3!)} = 35$
5'li	$\binom{7}{5} = \frac{7!}{(5! 2!)} = 21$
6'lı	$\binom{7}{6} = \frac{7!}{(6! 1!)} = 7$
7'li	$\binom{7}{7} = \frac{7!}{(7! 0!)} = 1$
Toplam	120

Tablo 2-1'de görüldüğü gibi 7 faktörlü bir deneyde faktörlerin eksiksiz bir şekilde birbirleri ile eşleştirilmesi durumunda ortaya 128 adet gözlem çıkar. Etki sayısı toplamı 127'dir. Bu 127 etkinin, 7 adedi ana etki, kalan 120 adedi ise etkileşim etkileridir. Bu tip deneylerde harcanan zaman ve enerjinin büyük kısmı etkileşimli durumların çözümü içindir. Yapılan pratik çalışmalarda 3'lü, 4'lü veya daha yüksek dereceli etkileşimli deneylerin sayısının iki dereceli etkileşimlerin sayısından daha

yüksek olduğu durumlara rastlanmamaktadır. Bu nedenle genel olarak ikili etkileşimlerin üstündeki durumlar ihmal edilebilir. Ayrıca Tablo 2.1 de ikili etkileşimin üstünde 99 adet etkileşim olduğu gösterilmiştir.

2.1.2.3. Taguchi Metodu İle Tasarım

Taguchi yöntemi, sağlam deney tasarımı yoluyla bir süreçteki varyasyonu azaltmayı içerir. Yöntemin genel amacı, üreticiye düşük maliyetle yüksek kaliteli ürün üretmektir. Taguchi yöntemi, bu varyasyonu sürdüren Japonya'dan Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi, farklı parametrelerin, sürecin ne kadar iyi çalıştığını tanımlayan bir süreç performans özelliğinin ortalamasını ve varyansını nasıl etkilediğini araştırmak için deneyler tasarlamak için bir yöntem geliştirdi. Taguchi tarafından önerilen deneysel tasarım, süreci etkileyen parametreleri ve bunların değişmesi gereken seviyeleri düzenlemek için ortogonal dizilerin kullanılmasını içerir. Faktöriyel tasarım gibi tüm olası kombinasyonları test etmek yerine, Taguchi yöntemi kombinasyon çiftlerini test eder. Bu, minimum deneme miktarı ile ürün kalitesini en çok hangi faktörlerin etkilediğini belirlemek için gerekli verilerin toplanmasını sağlar, böylece zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlar. Taguchi yöntemi, orta düzeyde değişken sayısı (3 ila 50) olduğunda, değişkenler arasında az sayıda etkileşim olduğunda ve yalnızca birkaç değişken önemli ölçüde katkıda bulunduğunda en iyi şekilde kullanılır.

Taguchi dizileri türetilabilir veya aranabilir. Küçük diziler manuel olarak çizilebilir; büyük diziler deterministik algoritmalarla türetilir. Genellikle diziler çevrimiçi olarak bulunabilir. Diziler, parametre sayısı (değişkenler) ve düzey sayısı (durumlar) tarafından seçilir. Bu, bu makalenin ilerleyen bölümlerinde daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Deneylerin Taguchi tasarımından toplanan veriler üzerindeki varyans analizi, performans karakteristiğini optimize etmek için yeni parametre değerleri seçmek için kullanılabilir. Dizilerden elde edilen veriler, verilerin grafiği çizilerek ve görsel bir analiz, ANOVA, kutu verimi ve Fisher'in kesin testi veya anlamlılığı test etmek için Ki-kare testi yapılarak analiz edilebilir.

Taguchi Yönteminin Felsefesi

Bu yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için yöntemin temel dayanak noktası olan 3 husus iyi bilinmelidir. Bunlar;

1. Kalite bir üründe tasarlanmalı, incelenmemelidir. Kalite, sistem tasarımı,

parametre tasarımı ve tolerans tasarımı yoluyla bir süreç olarak tasarlanır. Bu makalenin odak noktası olacak parametre tasarımı, ürünü en çok hangi süreç parametrelerinin etkilediğini belirleyerek ve ardından bunları belirli bir hedef ürün kalitesi verecek şekilde tasarlayarak gerçekleştirilir. Bir ürünün kalite "incelenmesi", ürünün rastgele kalite seviyelerinde üretildiği ve ortalamadan çok uzak olanların basitçe atıldığı anlamına gelir. (Fraley vd., 2022)

2. Kalite en iyi şekilde bir hedeften sapmayı en aza indirerek elde edilir. Ürün, kontrol edilemeyen çevresel faktörlere karşı bağışık olacak şekilde tasarlanmalıdır. Diğer bir deyişle, sinyal (ürün kalitesi) gürültüye (kontrol edilemeyen faktörler) oranı yüksek olmalıdır.
3. Kalite maliyeti standart miktardan sapmanın bir fonksiyonu olarak ölçülmeli ve oluşan kayıp değerleri sistem çapında ölçülmelidir. Bu, kayıp işlevi kavramı veya düşük kaliteli bir üründen müşteri ve toplum üzerinde meydana gelen toplam kayıptır. Üretici aynı zamanda toplumun bir üyesi olduğundan ve müşteri memnuniyetsizliği gelecekteki patronluktan caydıracağından, müşteriye ve topluma olan bu maliyet üreticiye geri dönecektir.

Taguchi yöntemi kullanılarak başarılı bir sonuç elde edebilmek için planlı ve sistematik bir çalışma düzenine ihtiyaç duyulur. Bu planlı çalışma neticesinde doğru sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır.

Bir deneyde başlangıç ve elde verilerin analizi ile deneyi tamamlama aşamaları sekiz başlık altında incelenir (Şanyılmaz, 2006).

1. Problemin belirlemesi
2. Faktör ve seviyelerin belirlenmesi
3. Ortogonal dizi ve seçimleri
4. Faktörlerin kolonlara atanması
5. Deneylerin gerçekleştirilmesi ve verilerin toplanması
6. Verilerin analizi
7. Anova tablosunun analizi
8. Doğrulama deneylerinin yapılması

Taguchi Kayıp Fonksiyonu

Taguchi yönteminin amacı, imalat süreçlerindeki değişkenliğin üreticiye ve topluma olan maliyetlerini azaltmaktır. Taguchi, bir sürecin performans özelliğinin

hedef değeri olan τ ile ölçülen değer olan y arasındaki farkı aşağıda denklem 2.5 de gösterildiği gibi bir kayıp fonksiyonu olarak tanımlar.

$$l(y) = k_c (y - \tau)^2 \quad (2.5)$$

Denklem 2.6 da belirtilmiş olan kayıp fonksiyonundaki sabit k_c , spesifikasyon limitleri veya kabul edilebilir delta aralığı dikkate alınarak belirlenebilir.

$$k_c = C / \Delta^2 \quad (2.6)$$

k_c 'yi belirlemedeki zorluk, τ ve C 'yi tanımlamanın bazen zor olmasıdır. Amaç, performans karakteristik değerinin en aza indirilmesi ise, denklem 2.7 de belirtildiği üzere kayıp fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$l(y) = k_c y^2 \quad (2.7)$$

burada $\tau=0$ dır.

Amaç, performans karakteristik değerinin maksimize edilmesi ise, kayıp fonksiyonu denklem 2.8 de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$l(y) = k_c / y^2 \quad (2.8)$$

Burada açıklanan kayıp fonksiyonları, bir müşterinin bir üründen kaynaklanan kaybıdır. Bu kayıp fonksiyonları hesaplanarak, topluma verilen genel kayıp da hesaplanabilir.

Ortogonal Dizinin Parametre Tasarımının Belirlemesi

Birçok farklı parametrenin, yoğunlaştırılmış bir deney setindeki performans karakteristiği üzerindeki etkisi, Taguchi tarafından önerilen ortogonal dizi deneysel tasarımı kullanılarak incelenebilir. Kontrol edilebilir bir prosesi etkileyen parametreler belirlendikten sonra, bu parametrelerin hangi seviyelerde değiştirileceği de belirlenmelidir. Bir değişkenin hangi seviyelerinin test edileceğini belirlemek, parametrenin minimum, maksimum ve geçerli değeri dâhil olmak üzere sürecin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. Bir parametrenin minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark büyükse, test edilen değerler birbirinden daha da uzaklaşabilir veya daha fazla değer test edilebilir. Bir parametrenin aralığı küçükse, daha az değer test edilebilir veya test edilen değerler birbirine daha yakın olabilir. Örneğin, bir reaktör ceketinin sıcaklığı 20 ila 80 °C arasında değişebiliyorsa ve mevcut çalışma ceket sıcaklığının 50 °C olduğu biliniyorsa, 20, 50 ve 80 °C'de üç seviye seçilebilir.

Deney tasarımına dâhil edilecek bir parametrenin seviye sayısı belirlenirken deney yürütme maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Önceki ceket sıcaklığı örneğinde, 1 derecelik aralıklarla 60 seviye yapmak çok maliyetli olacaktır. Tipik olarak, deneysel tasarımdaki tüm parametreler için seviye sayısı, uygun ortogonal dizinin seçimine yardımcı olmak için aynı olacak şekilde seçilir.

Parametre sayısı ve seviye sayısı bilinerek uygun ortogonal dizi seçilebilir. Dizi seçici tablosu kullanılarak, parametre sayısına ve düzey sayısına karşılık gelen sütun ve satıra bakılarak uygun dizinin adı bulunabilir. Ad belirlendikten sonra (alt simge, tamamlanması gereken deney sayısını temsil eder), önceden tanımlanmış diziye bakılabilir. Dizi seçici tablosunda verilen önceden tanımlanmış dizilerin çoğuna bağlantılar sağlanır. Bu diziler, Taguchi'nin geliştirdiği bir algoritma kullanılarak oluşturuldu ve her değişkenin ve ayarın eşit şekilde test edilmesine izin vermektedir. Örneğin, üç parametremiz (gerilim, sıcaklık, basınç) ve iki seviyemiz (yüksek, düşük) varsa, uygun dizinin L4 olduğu görülebilir. L4 dizisini görüntülemek için L4 bağlantısına tıklandığında, dizide dört farklı deneyin verildiği görülebilir. Dizide 1, 2, 3 vb. olarak belirtilen seviyeler değiştirilecek gerçek seviye değerleri ile değiştirilmeli ve P₁, P₂, P₃ gerçek parametrelerle (yani voltaj, sıcaklık vb.) değiştirilmelidir.

Ortogonal Dizilerin Seçimi ve Kullanımına İlişkin Önemli Notlar

Dizi seçici, her parametrenin aynı sayıda seviyeye sahip olduğunu varsayar. Bazen durum böyle değildir. Genelde en yüksek değer alınır veya aradaki fark bölünür.

Aşağıdaki örnekler, bir ortogonal diziyi seçme ve düzgün bir şekilde kullanma hakkında fikir verir. Örnek 1 ve 2, dizi seçimine odaklanırken, Örnek 3, bu durumlardan birinde ortogonal bir dizinin nasıl kullanılacağını gösterecektir.

Örnek 1:

parametre: A, B, C, D = 4 # seviye: 3, 3, 3, 2 = ~3 dizi: L9

Örnek 2:

parametre: A, B, C, D, E, F = 6 # seviyeler: 4, 5, 3, 2, 2, 2 = ~3 dizi: değiştirilmiş L16

Örnek 3:

Bir reaktörün davranışı pervane modeline, mikser hızına, kullanılan kontrol algoritmasına ve soğutma suyu valf tipine bağlıdır. Her biri için olası değerler aşağıdaki gibidir:

Pervane modeli: A, B veya C

Mikser hızı: 300, 350 veya 400 RPM

Kontrol algoritması: PID, PI veya P

Valf tipi: Kelebek veya küre

4 parametre vardır ve valf tipi hariç her birinin 3 seviyesi vardır. En yüksek seviye sayısı 3'tür, bu nedenle ortogonal dizimizi seçerken 3 değerini kullanacağız.

Yukarıdaki dizi seçiciyi kullanarak, uygun ortogonal dizinin Tablo 2.2 de tasarımı verilmiş olan L9 olduğunu buluruz.

Tablo 2.2. Taguchi metoduna göre L9 ortogonal deney tasarımı

Deney No	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

P₁, P₂, P₃ ve P₄ 'ü kendi parametrelerimizle değiştirip parametre değerlerini doldurmaya başladığımızda, L9 dizisinin valf tipi için 3 seviye içerdiğini, sistemimizde ise sadece 2 olduğunu görüyoruz. Uygun strateji, rastgele, dengeli bir şekilde 1 veya 2 ile P₄ = 3 girişleridir. Verilen parametre ve seviyelerine göre Tablo 2.3 teki örneği incelersek:

Tablo 2.3. Taguchi metoduna göre L9 ortogonal deney tasarımı

Deney No	Pervane Tipi	Mikser Hızı	Kontrol Algoritması	Valf Tipi
1	A	300	PID	BF
2	A	350	PI	G
3	A	400	P	G
4	B	300	PI	BF
5	B	350	P	BF
6	B	400	PID	G
7	C	300	P	G
8	C	350	PID	BF
9	3	400	PI	BF

Burada üç değer iki kez kelebek ve bir kez de küresel vana olarak seçilmiştir. Seçilen vana tipleri yeşil renk ile işaretlenmiş olanlardır.

Parametre ve düzey sayısına göre seçilen dizi, deneysel tasarımda kullanılandan daha fazla parametre içeriyorsa, ek parametre sütunlarını dikkate alınmamalıdır. Örneğin, bir işlemin her biri 2 seviyeli 8 parametresi varsa, dizi seçiciye göre L12 dizisi seçilmelidir. Tablo 2.4 de görüldüğü gibi, L12 Dizisi 11 parametre ($P_1 - P_{11}$) için tabloda görülmekte olan sütunlara sahiptir. Sağdaki turuncu renk ile gösterilmiş olan üç sütun yok sayılmalıdır.

Tablo 2.4. L12 ortogonal deney tasarımı

D.N.	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
7	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Deney Verilerinin Analiz Edilmesi

Bu metot da Sinyal/Gürültü (S/N) oranı dikkate alınır. S/N oranına göre diğerlerinden farklı olan faktör sonuç üzerinde etkilidir. Başka bir ifadeyle S/N oranı farklı olan faktörün sonucu değiştirebilecek bir parametre olduğu söylenebilir. S/N oranı, standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılır. Sinyal faktörü, gürültü ise faktörün sonuç üzerindeki etkisini ifade eder. S/N oranı 3 farklı yaklaşım üzerinden oluşur ve deney neticesinde sonucu belirleyen bulgunun sayısal olarak büyüklüğüne bağlıdır. Bunlar:

- En iyinin en düşük olması durumu

$$\frac{S}{N} : -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 \right) \quad (2.9)$$

Y değerinin hedefi sıfırdır. En küçük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder ve denklem 2.9 da verilmiştir. Örneğin sürtünme, dişlilerin aşınması ve su basıncının azalması vb.

- En iyinin en yüksek olması durumu

$$\frac{S}{N} : -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (2.10)$$

Bu tip bir yaklaşımda, Y'nin hedef değeri sonsuzluktur. Yani istenen hedef değeri negatif olmayan ölçülebilir bir değerdir. En büyük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder ve denklem 2.10 da ifade edilmiştir. Örneğin tork, alev alma noktası ve vakum kalitesi vb.

- En iyinin nominal değer olması durumu

$$\frac{S}{N} : 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (2.11)$$

Denklemler de verilen y sonuç değeri, n tekrar sayısı, $\bar{y}$ dizinin aritmetik ortalaması ve s_y^2 standart sapma olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada maksimum talaş yoğunluğunun elde edilmesi amacıyla S/N analizleri “en büyük-en iyi” durumuna göre yapılmıştır.

Bu durumda ise, ikili toleransı olan bir karakteristiğimiz olduğunda denklem 2.11 de verilmiş olan nominal değer hedeftir. Yani bütün parçalar bu değere getirilirse, varyasyon yani farklılık ortadan kalkar ve sonuçta hedeflenen en iyi değere ulaşılmış

olur. Hedef değeri en iyi durumu için sinyal/gürültü oranıdır. Örnek verilirse ürün boyutları gibi kalite karakteristiği özelliklerine bakılmaksızın, daha yüksek bir S/N oranı için daha iyi kalite özellikleri anlamını taşır. Bundan dolayı, proses parametrelerinin en iyi yani optimal seviyesi en yüksek S/N oranına sahip olan seviyedir.

Yapılan bu çalışmada en büyük yoğunluk değeri sıkıştırmanın kalitesi bakımından en iyi sonucu vereceğinden en yüksek (büyük) en iyi olduğu durumu istatistik ifadesi olarak seçilmiştir.

Taguchi deney tasarımı metodu en iyi sonuca ulaşma problemlerinin çözümünde çok üstün nitelikte bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Taguchi metodu, çözümün minimal sayıdaki deney ile elde edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda nitelikli üretim döngüsünün sağlanmasını ve yüksek kalitede ürün geliştirilmesini destekler (Meral vd., 2011).

Metodun Avantaj ve Dezavantajları

Taguchi yönteminin bir avantajı, belirli spesifikasyon sınırları içindeki bir değerden ziyade, hedef değere yakın bir ortalama performans karakteristik değerini vurgulaması ve böylece ürün kalitesini iyileştirmesidir. Ek olarak, Taguchi'nin deneysel tasarım yöntemi basit ve birçok mühendislik durumuna uygulanması kolaydır, bu da onu güçlü ancak basit bir araç haline getirir. Bir araştırma projesinin kapsamını hızla daraltmak veya hali hazırda var olan verilerden bir üretim sürecindeki sorunları belirlemek için kullanılabilir. Ayrıca, Taguchi yöntemi, engelleyici derecede yüksek miktarda deney olmaksızın birçok farklı parametrenin analizine izin verir. Örneğin, her biri 3 duruma sahip 8 değişkenli bir süreç, tüm değişkenleri test etmek için 6561 (3^8) deney gerektirecektir. Bununla birlikte, Taguchi'nin ortogonal dizilerini kullanarak, yalnızca 18 deney gereklidir veya orijinal deney sayısının % 0,3 'ünden azı gereklidir. Bu şekilde, performans karakteristik değeri üzerinde en fazla etkiye sahip anahtar parametrelerin tanımlanmasına izin verir, böylece bu parametreler üzerinde daha fazla deney yapılabilir ve etkisi az olan parametreler göz ardı edilebilir.

Taguchi yönteminin ana dezavantajı, elde edilen sonuçların yalnızca göreceli olması ve performans karakteristik değeri üzerinde hangi parametrenin en yüksek etkiye sahip olduğunu tam olarak göstermemesidir. Ayrıca, ortogonal diziler tüm değişken kombinasyonlarını test etmediğinden, bu yöntem tüm değişkenler arasındaki

tüm ilişkilerle birlikte kullanılmamalıdır. Taguchi yöntemi, literatürde parametreler arasındaki etkileşimleri hesaba katmadaki zorluk nedeniyle eleştirilmiştir. Diğer bir sınırlama, Taguchi yöntemlerinin çevrimdışı olması ve bu nedenle simülasyon çalışması gibi dinamik olarak değişen bir süreç için uygun olmamasıdır. Ayrıca, Taguchi yöntemleri, düşük kaliteyi düzeltmek yerine kaliteyi tasarlamakla ilgilendiğinden, süreç geliştirmenin erken aşamalarında en etkili şekilde uygulanırlar. Tasarım değişkenleri belirlendikten sonra, deneysel tasarımın kullanımı daha az maliyetli olabilir.

Tek faktörlü (One way) varyans analizi 3 veya daha çok grup içeren bir deney tasarımında, belirli bir değişkene dayalı farklılık olup olmadığını belirlemek amacıyla tercih edilmektedir. Temelde varyans analizi, gruplar arasındaki değişkenliğin, grupların içindeki bireyler arasındaki değişkenliğe oranı olarak tarif edilebilir. Bu analizin gayesi, gruplar arasındaki farklılaşmanın, bireyler arasındaki farklılaşmadan büyük olup olmadığını belirlemektir. Bu çalışma kapsamında uygulanmış olan varyans analizi, Minitab 19 programında yer alan Anova (One Way) çözümlemesi ile yapılmıştır.

Anova ile varyans analizi yapılan tasarım parametrelerinin doğrulanması gerekir. Bu nedenle optimize sonuç değerinde belirlenen faktör seviyeleri dikkate alınarak doğrulama deneyi yapılmalıdır.

Varyans analizi yapıldıktan sonra çalışmadan istenen sonuca göre regresyon (denklem kurma) işlemi yapılabilir. Denklem 2.12 de regresyonun nasıl kurulacağı belirtilmiştir. Denklemde yer alan Y bağıl değişkeni, i kesişim değerini, s doğrunun eğimini, X ise bağımsız değişkeni tarif etmektedir.

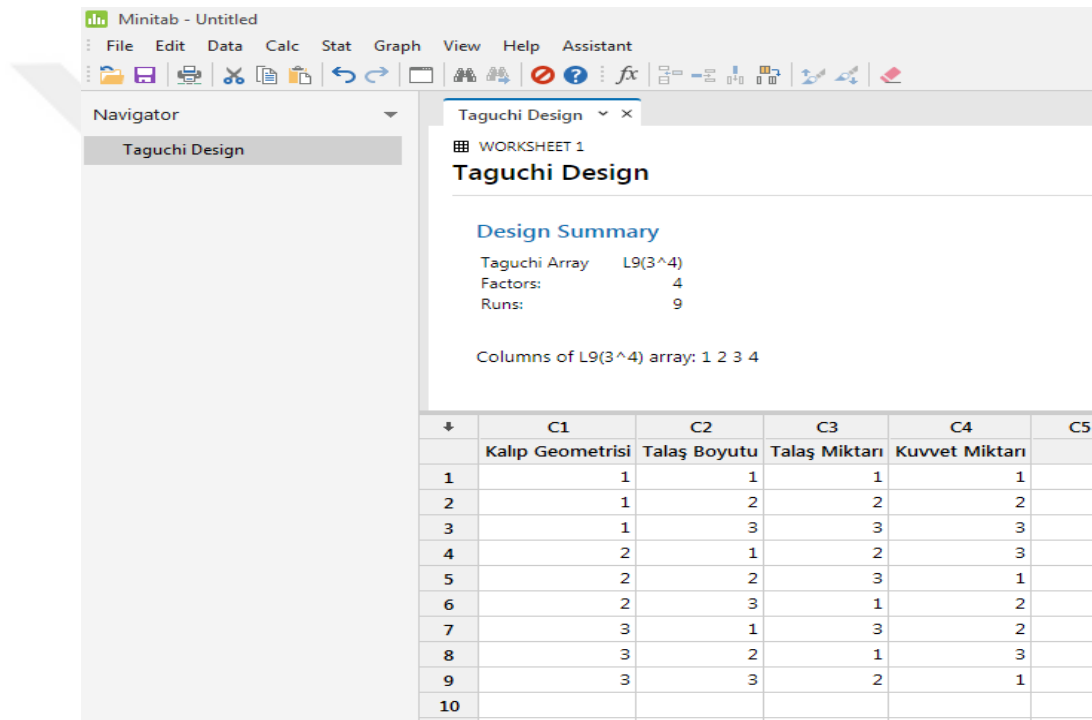
$$Y = i + s \cdot X \quad (2.12)$$

Tablo 2.5 de bu çalışmada deney girdisi olarak kullanılmış olan faktörler ve bu faktörlere bağlı seviyeler belirtilmiştir.

Tablo 2.5. Faktörler ve seviyeleri

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kalıp Geometrisi	Kare	Altıgen	Dairesel
Talaş Boyutu	Kalın	Orta	İnce
Talaş Miktarı	10 gr	12,5 gr	15 gr
Kuvvet miktarı	5500 kgf	6500 kgf	7500 kgf

Şekil 2.7 de verilen Minitab-19 programı ekran görüntüsü bu çalışmada belirlenmiş olan faktör ve seviyelerine uygun Taguchi deney tasarımını belirtmektedir.



The screenshot shows the Minitab-19 Taguchi Design interface. The 'Design Summary' section indicates a Taguchi Array of L9(3^4) with 4 factors and 9 runs. Below this, a table displays the Taguchi L9(3^4) array with columns for factors and their levels across 9 runs.

	C1	C2	C3	C4	C5
	Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Kuvvet Miktarı	
1	1	1	1	1	
2	1	2	2	2	
3	1	3	3	3	
4	2	1	2	3	
5	2	2	3	1	
6	2	3	1	2	
7	3	1	3	2	
8	3	2	1	3	
9	3	3	2	1	
10					

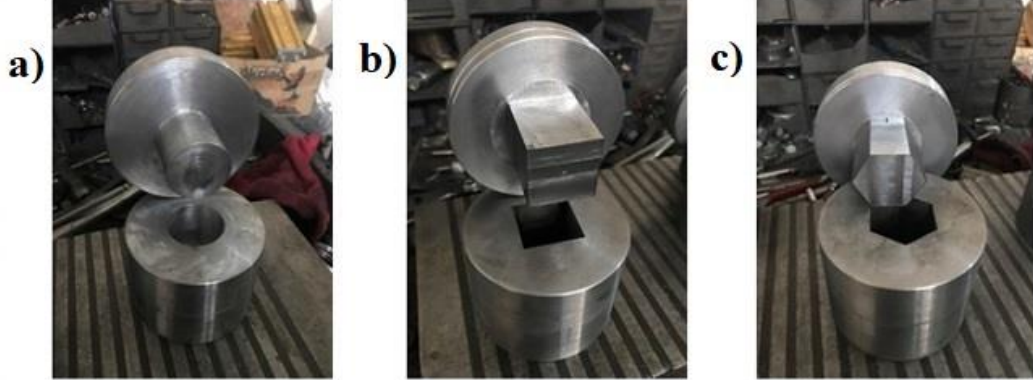
Şekil 2.7. Minitab istatistik programı ara yüzü

4 faktör ve 3 seviye için uygun olan L9 ortogonal dizilimi deney tasarımı sonucu Tablo 2.6’de gösterilmiştir. 2 ve 3 nolu deneylerde kalıp geometrisi 1 nolu deneyde olduğu gibi sabit tutulurken diğer faktörlerin seviye değişimleri eş tutulmuştur. Ancak 4,5, vb. diğer deneylerde kalıp geometrisi haricindeki faktörlerin seviye değişimleri birbirlerinden farklıdır.

Tablo 2.6. Taguchi deney tasarımı

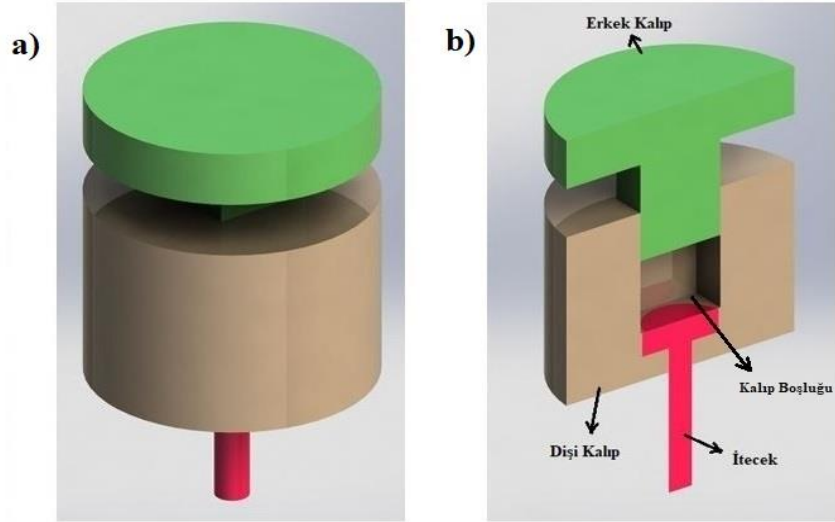
Deney No	Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Kuvvet Miktarı
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen farklı geometrilerdeki kalıplar Şekil 2.8'de görülmektedir. AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşlarından numune üretmek amacıyla dairesel, kare ve altıgen geometrili kalıplar hazırlanmıştır.



Şekil 2.8. Sıkıştırma kalıpları (a) Dairesel; (b) Kare; c) Altıgen

Tek yönde kuvvet ile sıkıştırma işlemi yapan kalıpların detayı Şekil 2.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi dişi kalıp içerisinde yer alan kalıp boşluğuna alüminyum talaşı doldurulduktan sonra +z yönünde ilerleyen erkek kalıp malzemeyi sıkıştırmaktadır. Talaşların hareket +z eksenini yönünde olup, xy düzleminde ancak kalıp yüzeyine kadar oluşabilen sınırlı bir hareket alanı mevcuttur. Alanın sınırlı olması talaş tanelerinin iç içe geçmesine ve üst üste binmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.9. Kalıp tasarım görünüşleri, (a) Montaj; (b) Kesit

2.2. Malzeme Ve Sınıflandırılması

AISI 1040 çeliği ekonomik ve işlenme kabiliyetinin yüksek oluşu nedeniyle endüstriyel faaliyetlerin birçok alanında kullanım imkânı bulur. Tablo 2.7 de AISI 1040 çeliğinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.7. AISI 1040 çeliğinin kimyasal özellikleri (Harun vd., 2016)

Element	Mn	C	Si	S	P
Yüzde (%)	0,6-0,9	0,40-0,50	0,25-0,35	$\leq 0,05$	$\leq 0,04$

Tablo 2.8 de ise AISI 1040 çeliğine ait mekanik özellikler verilmiştir. Yapılacak deney ve teorik çalışmalarda bu veriler kullanılmıştır. Çelik talaşı ve kalıpta kullanılan çelikler 190 HB sertliğinde olup herhangi bir sertleştirme işlemine tabi tutulmamıştır.

Tablo 2.8. AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri (Azomaterials, 2012)

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Elastiklik modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)	Kayma modülü (GPa)
620	415	190-210	0,27-0,30	80

7xxx serisi alüminyum alaşımlarında yüksek mukavemet, yorulma direnci ve tokluk, düşük süneklik ve yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı daha çok havacılık endüstrisi olmak üzere endüstriyel faaliyetlerin birçok alanında hammadde olarak önemli ölçüde kullanılmaktadır (Williams ve Starke Jr, 2003).

Bu çalışmada kullanılan AA7075’e ait kimyasal özellikler Tablo 2.9 da verilmiştir.

Tablo 2.9. AA7075’in kimyasal özellikleri (Uzun ve Arslan, 2021)

Element	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Zr
Yüzde (%)	89,6	0,403	0,549	0,014	1,568	2,596	5,48	0,013	0,031

Talaş tanelerinde meydana gelen sıkışmayı daha iyi anlayabilmek için AA7075’in mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Tablo 2.10 da ise AA7075 ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.10. AA7075 alaşımının mekanik özellikleri (Azomaterials, 2005)

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Elastiklik modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)	Kayma modülü (GPa)
570	505	68,3	0,34	25,49

Ms62 pirinç işleme kabiliyetinin yüksek oluşu, elektrik iletkenliği ve korozyon direnci sebebiyle imalat sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.11 de Ms62 ‘nin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.11. Ms62 ‘nin kimyasal özellikleri (Gico, 2021)

Element	Cu	Pb	Fe	Ni	Sn	Al	Zn	Diğer
Yüzde (%)	59	0	0	0	0	0	Kalan	0
	61,5	0,05	0,2	0,2	0,2	0,05	Kalan	0,2

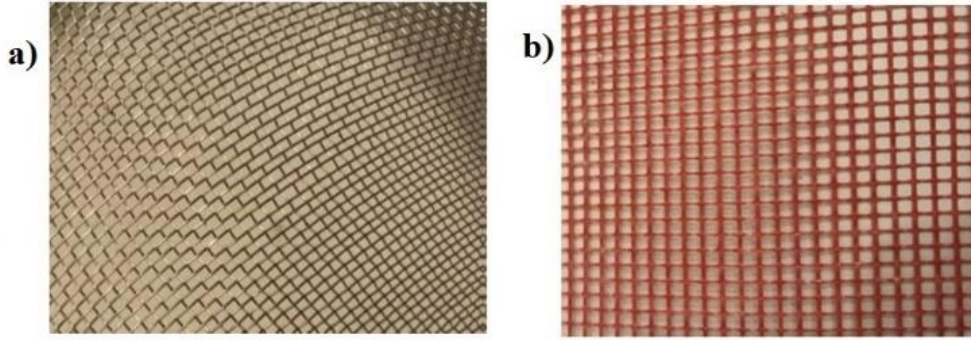
Tablo 2.12 de ise Ms62 ‘e ait mekanik özellikler verilmiştir. Yapılacak deney ve teorik çalışmalarda bu veriler kullanılmıştır.

Tablo 2.12. Ms62 ‘nin mekanik özellikleri (Gico, 2021; Azomaterials)

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Elastiklik modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)	Kayma modülü (GPa)
370	145	105	0,34-0,35	33-46

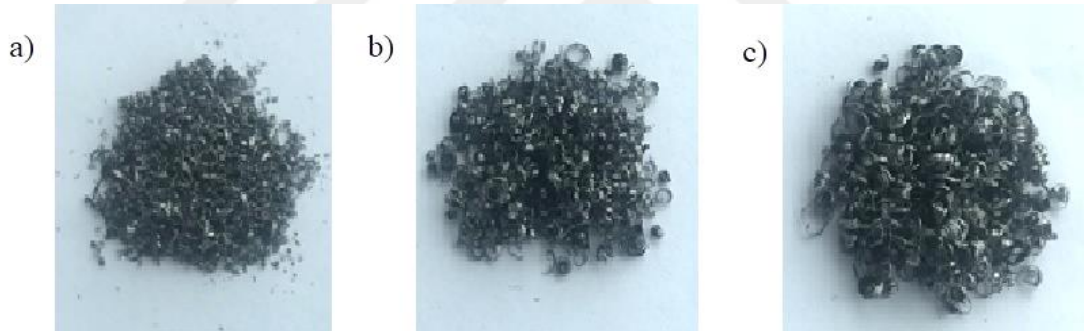
Talaşlar tornalama ve testere ile kesme işlemleri neticesinde elde edilmiştir. Şekil 2.10 da tornalama ve kesme işlemlerinden elde edilen talaşların boyutsal olarak

sınıflandırılabilmesi için kullanılmış elekler verilmiştir.

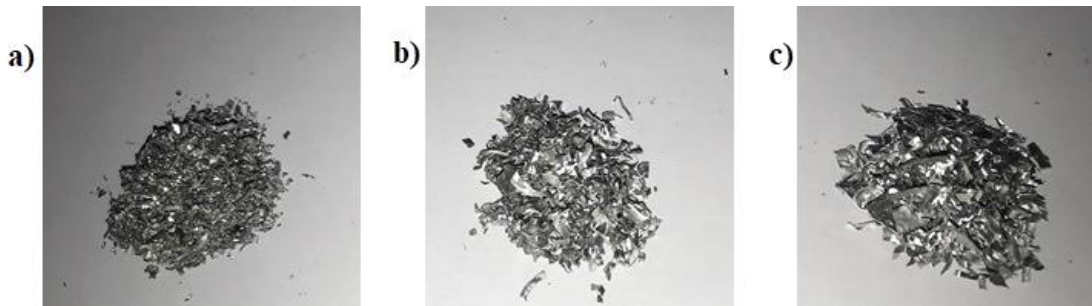


Şekil 2.10. Elek boyutları, (a) $x < 2$ mm; (b) $2 < x < 5$ mm

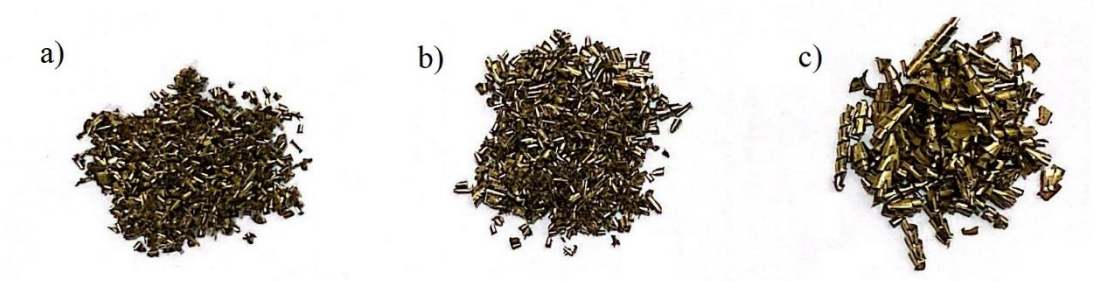
$x < 2$ mm ve $2 < x < 5$ mm ölçü aralığındaki farklı iki elekten geçirilerek, Şekil 2.11 de gösterilmiş olan üç farklı ebatta AISI 1040, Şekil 2.12 de verilen AA7075 ve Şekil 2.13 de resmedilmiş olan Ms62 talaşları elde edilmiştir.



Şekil 2.11. AISI 1040 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın



Şekil 2.12. AA7075 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın



Şekil 2.13. Ms62 talaşı boyutsal sınıflandırması, (a) İnce; (b) Orta; (c) Kalın

Bu talaşlar boyutlarına göre küçük, orta ve büyük ebatta sınıflandırılarak farklı seviyelerdeki basma işlemlerinde kullanılmıştır. Yapılan sınıflandırma Tablo 2.13 de verilmiştir.

Tablo 2.13. Elek ebadına göre talaş boyutu sınıflandırması

Elek Tipi (mm)	Elde Edilen	Sınıflandırma Kodu
$x < 2$ mm	$x < 2$ mm	İnce
$2 < x < 5$ mm	$2 < x < 5$ mm	Orta
$2 < x < 5$ mm	$5 < x$ mm	Kalın

2.3. Deney Düzeneği

Basma deneyi çekme deneyinin aksine uzayan değil daralan cismin mekanik davranışını inceler. Deney sonunda cismin boyundaki şekil değişimi miktarının ilk durumdaki ölçüsüne oranı birim şekil değiştirme oranı olarak bulunabilir. Şekil 2.14 de basma deney düzeneği görülmektedir. Deney düzeneği Mares-Tst_10t_me marka/model test cihazı, cihazdan elde edilen verilerin kayıt edildiği bilgisayar ve cihaza ait yazılımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.14. Basma deney düzeneği

Deneyde kullanılacak kalıp cihazın zımba ve tablası arasındaki boşluğa yerleştirildikten sonra zımbanın kalıbın üst yüzeyine temas edecek mesafeye kadar inmesi manuel olarak sağlanır. Ve sıfırlama işlemi yapılır. Böylece tezgâhın bu hareket mesafesi boyunca kat etmiş olduğu kuvvetin uygulanmadığı yüksüz aşama deney verisinden çıkartılmış olur. Daha sonra cihazın yazılımına ait ara yüzde numuneye ait geometrik bilgiler, uygulanacak kuvvet miktarı ve hız gibi belirlediğimiz verilerin sisteme girişi sağlanarak cihaz otomatik moda alınır. Ve deney başlatılır. Sistem istenen kuvvet değerine ulaştıktan sonra otomatik olarak kendini kapatır. Deneyin bitmesiyle cihazın sıkıştırma esnasında elde ettiği veri kayıt dosyasından alınarak bir sonraki deneye geçilir.

Deneyisel çalışmalarda, Taguchi deney tasarımında oluşturulmuş 9 farklı deney kombinasyonu AISI 1040, AA7075 ve Ms 62 talaşları için üçer defa tekrarlanmıştır. Basma test cihazının verilerine göre hacimsel doluluk oranı ve yoğunluk büyüklükleri tüm numuneler için hesaplanmıştır.

2.3.1. Hacimsel Doluluk Oranı

Hacimsel doluluk oranı dolu çubuk malzemeden talaş numunesinin ağırlığı ile aynı ağırlıkta ve alın yüzeyine paralel yönde kesilen bir plakanın hacminin, sıkıştırılmış talaş numunesinin geometrik olarak ölçülmesi ile hesaplanan hacmine oranı olarak hesaplanır. İki farklı hacim arasındaki oran denklem 2.12 de ifade

edilmiştir.

$$Hacimsel\ doluluk\ oranı = \frac{V_{dolu}}{V_{numune}} \quad (2.12)$$

Denklem 2.13 de ise numune ile aynı ağırlıkta olduğu ve dolu malzemeden imal edildiği varsayılan numunenin hacmi hesap edilmiştir. Bu ifade de m_{numune} deney tasarımı aşamasında faktör olarak belirtilmiş olan talaş ağırlığıdır ve 10, 12,5 ve 15 gr seviyelerinden ilgili deney numunesi tipine göre seçilir. $\rho_{malzeme}$ dolu malzemenin yoğunluk değeri olup AISI 1040 için 7,85 gr/cm³, AA7075 için 2,81 gr/cm³ ve Ms 62 için ise 8,41 gr/cm³ olarak alınmıştır.

$$V_{dolu} = \frac{m_{numune}}{\rho_{malzeme}} (cm^3) \quad (2.13)$$

Denklem 2.14 de verilen V_{numune} sıkıştırma işlemi sonrasında elde edilen numune yüksekliğinin numune alın yüzey alanı ile çarpımına eşittir. Numune yüksekliği önceki kısımda Şekil 2.1 de verilmiş olan h_s ifadesidir.

$$V_{numune} = h_s \times \text{Numune Alın Yüzeyi Alanı} \quad (2.14)$$

Numune alın yüzeyi alanı numunenin geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda daire, altıgen ve kare için geometrik alan hesabı formülleri verilmiştir. Bu ifadelerde D çap, a altıgenin bir kenar uzunluğu, b ise karenin bir kenar uzunluğudur.

- Dairesel geometri için $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
- Altıgen geometri için $A = \frac{3\sqrt{3}a^2}{2}$
- Kare geometri için $A = b^2$

2.3.2. Yoğunluk

Numune yoğunluğu kalıp içerisinde sıkıştırılan talaşın sıkıştırılma kalitesinin ölçümünde önemli parametredir. Hesaplanan bir büyüklüktür. Numune ağırlığının numune hacmine bölünmesi ile bulunur ve denklem 2.15 de gösterilmiştir.

$$\rho_{numune} = \frac{m_{numune}}{V_{numune}} (gr/cm^3) \quad (2.15)$$

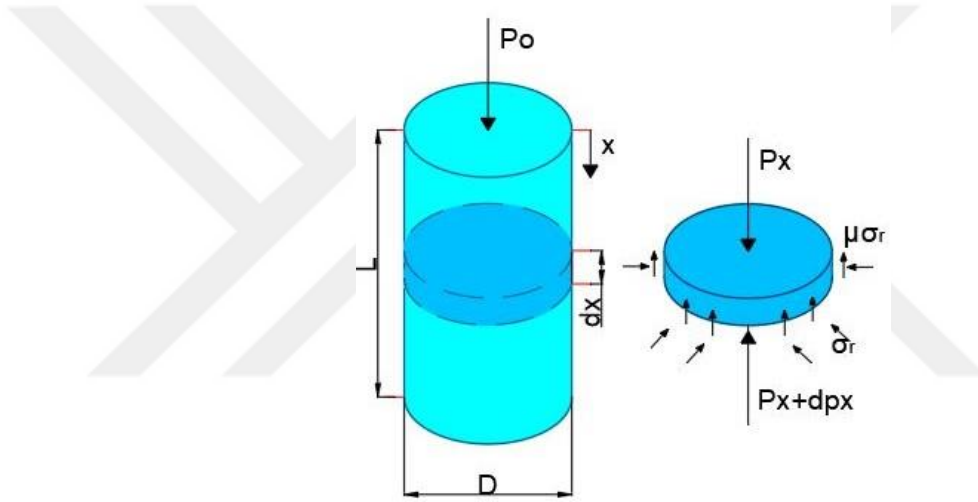
2.4. Matematiksel Metot

Farklı geometrideki üç kalıp için de matematiksel model oluşturmak gereklidir.

Bir kalıp içerisinde, sıkıştırma numunesi yüksekliği boyunca oluşan basınç dağılımı plak analizi metoduyla bulunur.

2.4.1. Dairesel Kalıpta Gerilme Durumu

İlk olarak dairesel numune incelenmiştir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi tek etkili sıkıştırmada yukarıdan uygulanan basınç hızlı bir şekilde taban yönünde etki eder. Şekilde görülen D numunenin çapını, L sıkıştırma yüksekliğini, P_0 ise zımba tarafından uygulanan basıncı ifade etmektedir. Üzerinde şekilde belirtildiği gibi gerilmeler bulunan dx kalınlığında bir elemanda, P_x net sıkıştırma basıncını, σ_r kalıp yan yüzeyi gerilmesini ve $\mu\sigma_r$ kalıp yan yüzeyi boyunca meydana gelen sürtünme gerilmesini ifade eder (Kalpakjian ve Schmid, 2008).



Şekil 2.15. Dairesel kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler

Denklem 2.16 da görüldüğü gibi yatay kuvvetlerin dengede olduğu kabul edilirse,

$$\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)p_x - \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)(p_x + dp_x) - (\pi D)(\mu\sigma_r)dx = 0 \quad (2.16)$$

denklem 2.17 deki haline indirgenmiş olur.

$$Ddp_x + 4\mu\sigma_r dx = 0 \quad (2.17)$$

Bu ifade de bir denklem ve iki bilinmeyen (P_x ve σ_r) vardır. Sıkıştırma anında parçacıklar arasında meydana gelen sürtünme denklem 2.18 de verilmiş olan k faktörü ifadesiyle tanımlanırsa, bu durumda;

$$\sigma_r = kp_x \quad (2.18)$$

ifadesi yazılabilir. Parçacıklar arasında sürtünme mevcut değilse, denklem 2.19 da belirtilmiş olan $k=1$ ve $\sigma_r = p_x$ durumlarının meydana geldiği hidrostatik basınç söz konusudur. Bu durumda ifade aşağıdaki gibi olur.

$$dp_x + \frac{4\mu kp_x dx}{D} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{dp_x}{p_x} = -\frac{4\mu k dx}{D} \quad (2.20)$$

Sınır koşullarına göre $x = 0$ da $P_x = P_0$ olacağından denklem 2.21 de verilmiş olan,

$$p_x = p_0 e^{-4\mu kx/D} \quad (2.21)$$

ifadesi elde edilir.

2.4.2. Altıgen Kalıpta Gerilme Durumu

Denklem 2.16 da verilmiş olan ifade Şekil 2.16 da gösterilen altıgen numune için uygulandığında,

$$\left(\frac{3\sqrt{3}a^2}{2}\right)p_x - \left(\frac{3\sqrt{3}a^2}{2}\right)(p_x + dp_x) - (6a)(\mu\sigma_r)dx = 0 \quad (2.22)$$

denklem 2.22 elde edilir. Sadeleştirme yapıldığında,

$$\left(\frac{3\sqrt{3}a}{2}\right)dp_x + 6\mu\sigma_r dx = 0 \quad (2.23)$$

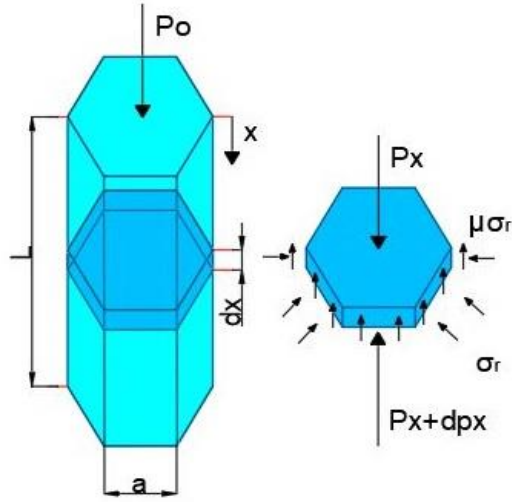
denklem 2.23 de verilen hale indirgenmiş olur ve $\sigma_r = kp_x$ ifadesi uygulanırsa aşağıda verilmiş olan denklem 2.24 elde edilir.

$$\frac{dp_x}{p_x} = -\frac{4\sqrt{3}\mu k dx}{3a} \quad (2.24)$$

Sınır koşullarına göre $x = 0$ da $P_x = P_0$ olacağından,

$$p_x = p_0 e^{-4\sqrt{3}\mu kx/3a} \quad (2.25)$$

denklem 2.25 ifadesi elde edilir.



Şekil 2.16. Altıgen kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler

2.4.3. Kare Kalıpta Gerilme Durumu

Dairesel ve altıgen geometride net basınç değerini veren denklemler, Şekil 2.17 de belirtilmiş kare kalıp içinde uygulanabilir. Bu durumda,

$$b^2 p_x - b^2 (p_x + dp_x) - (4b)(\mu \sigma_r) dx = 0 \quad (2.26)$$

denklem 2.26 ifadesi elde edilir. Sadeleştirme yapıldığında,

$$b dp_x = -4\mu \sigma_r dx \quad (2.27)$$

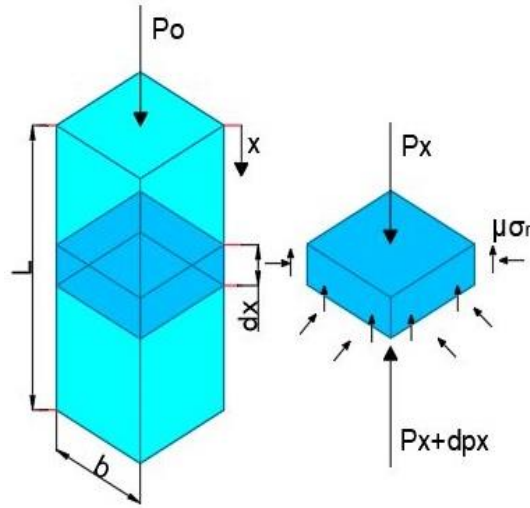
denklem 2.27 yazılır ve $\sigma_r = k p_x$ ifadesi uygulanırsa denklem 2.28 elde edilmiş olur.

$$\frac{dp_x}{p_x} = -\frac{4\mu k dx}{b} \quad (2.28)$$

Sınır koşullarına göre $x = 0$ da $P_x = P_0$ olacağından,

$$p_x = p_0 e^{-4\mu k x/b} \quad (2.29)$$

denklem 2.29 bulunmuş olacaktır.



Şekil 2.17. Kare kalıpta sıkışan malzemedeki basınç ve gerilmeler

Tablo 2.14 verilmiş olan denklemlerde ifade edilen “D” dairesel kalıpta sıkıştırılan numunelerin çapı olup imal edilmiş olan kalıbın çap ölçüsü olan 39,86 mm matematiksel hesaplamalarda çap değeri olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde “a” altıgenin kenar uzunluğu olup kalıptaki ölçü esas alınarak 17,80 mm ve karenin kenar uzunluğu olan “b” ise 35 mm büyüklük değerleriyle matematiksel hesaplamalarda kullanılmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısı “μ” ve şekil faktörü “k” 0 – 1 değer aralığında olan terimler olup her ikisi de 0,5 olarak kabul edilmişlerdir. Zımbanın ilerleme miktarı tüm kalıp geometrileri için eşit ve 15 mm olarak kabul edilmiş, net basınç formüllerinde uygulanmıştır. İlk uygulanan basınç ifadesi olan P_0 deney tasarımında en büyük kuvvet faktörü olan 7500 kgf büyüklüğündeki kuvvetin 1235 mm² lik numune yüzey alanına bölünmesiyle 61 MPa olarak bulunmuş ve Tablo 2.14 deki denklemlerde tüm kalıp geometrileri için aynı olacak şekilde uygulanmıştır.

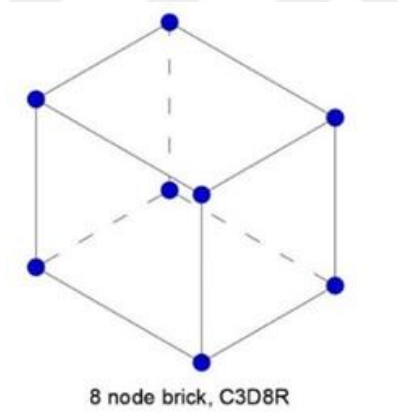
Tablo 2.14. Farklı kalıp denklemleri ile hesaplanmış P_x basınç büyüklükleri

Numune Şekli	Denklem	D (mm)	a (mm)	b (mm)	μ	k	x (mm)	P_0 (MPa)	P_x (MPa)
Kare	$p_x = p_0 e^{-4\mu kx/b}$	-	-	35	0,5	0,5	15	61	39,74
Altıgen	$p_x = p_0 e^{-4\sqrt{3}\mu kx/3a}$	-	17,80	-	0,5	0,5	15	61	37,50
Daire	$p_x = p_0 e^{-4\mu kx/D}$	39,86	-	-	0,5	0,5	15	61	41,79

2.5. Sonlu Elemanlar Metodu

Talaş malzemesinde kuvvet etkisi altında ortaya çıkan gerilme değerleri, malzemenin mekanik davranışının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Gerilmelerin şiddeti ve etki alanı arttıkça talaşın sıkıştırılması daha kolay olmaktadır. Bu nedenle deneysel numune çalışması öncesinde sonlu elemanlar metodu (FEM) ABAQUS/CAE 2021 programında kullanılarak, bu gerilmelerin hangi bölgelerde yoğunlaştığı ve büyüklük değerleri bulunmuştur.

Baskı numunesi, dolu ve izotropik kabul edilerek simülasyon yapılmıştır. Tüm numunelere alın yüzeyine dik olacak şekilde 7500 kgf yük uygulanmıştır. Numune alanı 1235 mm² olduğundan 61 MPa büyüklüğünde gerilme değeri oluşur. Simülasyonda bu gerilme değeri her üç kalıp geometrisi için uygulanmıştır. Zıt taraftaki yüzey ise ankastre şekilde sabitlenmiş diğer yüzeyler ise serbest halde bırakılmıştır. Parçanın genel geometrisi, Şekil 2.18 de verilmiş olan eş büyüklükteki C3D8R birim eleman kullanılarak mesh edilmiştir.



Şekil 2.18. C3D8R eleman modeli

Bu yük altında AISI 1040, AA7075 ve Ms62'in mekanik davranışını belirleyen ve programa tanımlanan elastik özellikler Tablo 2.15, 2.16 ve 2.17 de verilmiştir.

Tablo 2.15. AISI 1040 malzemesinin elastik özellikleri (AzoMaterials, 2012)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı (ν)
AISI 1040	7,85	210	0,30

Tablo 2.16. AA7075 malzemesinin elastik özellikleri (Empo, 2016; AzoMaterials, 2005)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)
AA7075	2,81	72	0,34

Tablo 2.17. Ms62 malzemesinin elastik özellikleri (Gico, 2021; Azomaterials)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)
Ms62	8,41	105	0,34 - 0,35

2.6. Kabuller

Bu çalışmada yapılmış olan kabuller Tablo 2.18 de belirtilmiştir. Yapılan bu kabullere göre deneysel çalışmalarda elde edilmiş veya matematiksel metot ile sonlu elemanlar metodunda yapılan hesaplamalar neticesinde hesaplanmış olan veriler bulunabilmiştir.

Tablo 2.18. Tez kapsamında yapılmış olan kabuller

MATERYAL VE YÖNTEM	
Deney Tasarımı	
Kalıp geometrisi çeşitleri	Kare Altıgen Dairesel
Talaş boyutu	x<2 mm (İnce), 2 mm<x<5 mm (Orta), x>5 mm (Kalın)
Talaş miktarı	10 gr - 12,5 gr - 15 gr
Kuvvet miktarı	5500 kgf – 6500 kgf – 7500 kgf
Malzeme ve Sınıflandırılması	
AISI 1040 Elastiklik modülü (E)	Tablo 2.8 de 0,27 - 0,30 aralığı olarak verilen değer 0,30 olarak kabul edilmiştir.
Ms62 Poisson oranı (v)	Tablo 2.12 de 0,34 - 0,35 aralığı olarak verilen değer 0,35 olarak kabul edilmiştir.
Deney Düzenegi	
Hacimsel doluluk oranı	Eşit ağırlıktaki dolu cismin hacminin sıkıştırılan briket hacmine oranıdır.

Tablo 2.18 (devamı)

Matematiksel Metot		
Dairesel numune çapı (D)	39,86 mm	
Altıgen numune kenar uzunluğu (a)	17,80 mm	
Kare numune kenar uzunluğu (b)	35 mm	
Sürtünme katsayısı (μ)	0,5	
Şekil faktörü (k)	0,5	
Zımba ilerleme miktarı	15 mm	
Uygulanan ilk basınç değeri (P_0)	61 MPa	(7500 kgf / 1235 mm ²)

3. BULGULAR

Bulgular deneysel çalışma, sonlu elemanlar metodu ve matematiksel metot başlıkları altında verilmiştir. Bu başlıklara ilaveten AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaş malzemelerine göre alt başlıklar konu bütünlüğü içerisinde belirtilmiştir.

3.1. İstatistiksel Metot

L9 ortogonal diziliimli deney tasarımına ait bulgular AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşları için istatistiksel olarak incelenmiştir. Bulunan veriler Anova yöntemi ile varyans analizi yapılarak faktörlerin anlamlılık durumu belirlenmiştir. Ayrıca tahmin edilen ideal deney için doğrulama deneyi 3 defa yapılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tüm farklı kalıp geometrilerinde kuvvete bağlı olarak yoğunluk değerini elde edebileceğimiz denklemler regresyon yapılarak elde edilmiştir.

3.1.1. AISI 1040 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi Sonuçları

Tablo 3.1 de Taguchi metodu ile tasarlanmış deneylerde yoğunluk değerleri sonuç kriteri olarak belirlendiğinde faktör ve seviyelerin sonuç üzerindeki etki sıralaması verilmiştir.

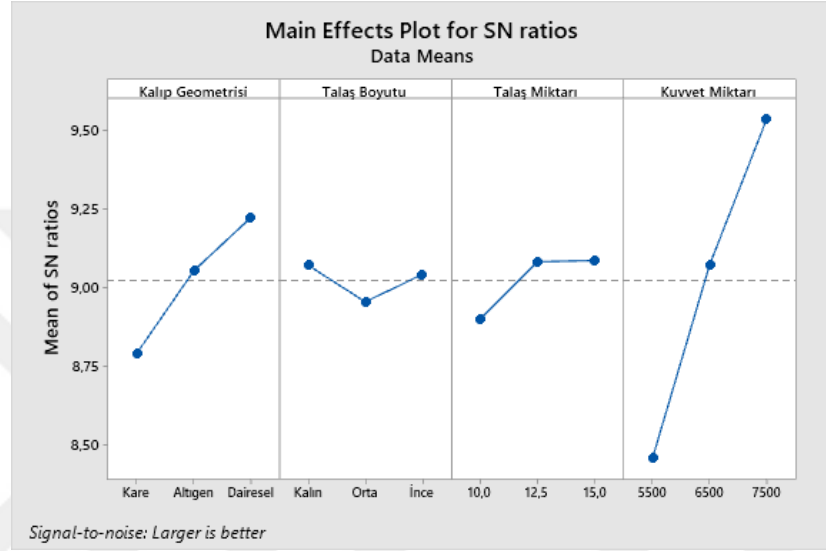
Tablo 3.1. AISI 1040 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması

	Kalıp	Talaş	Talaş	Kuvvet
Seviye	Geometrisi	Boyutu	Miktarı	Miktarı
1	8,790	9,070	8,899	8,456
2	9,053	8,954	9,082	9,072
3	9,223	9,042	9,085	9,537
Fark	0,433	0,117	0,187	1,081
Sıralama	2	4	3	1

Tablo 3.1 'e göre en etkili faktör kuvvet, etki oranı en az olan faktör ise talaş boyutudur. Tabloda bir faktörün en büyük ve en küçük S/N değerleri arasındaki fark ne kadar büyük ise, o faktör bağıl değişken olan yoğunluğu diğer faktörlere nispeten daha fazla etkilemektedir. Sonuç üzerindeki etkilerine göre faktörler sıralandığında en etkin değer 1. olarak belirtilmiş olan kuvvet faktörüdür. En düşük etki değerine sahip faktör ise 4. olarak belirtilmiş olan talaş boyutudur.

Bu sıralama Tablo 3.1 de en alt satırda gösterilmiştir. Bu tabloda kalıp geometrisi için 1. seviye kare, 2. seviye altıgen ve 3. seviye dairesel geometridir. Talaş boyutu

için 1. seviye kalın, 2. seviye orta ve 3. seviye ince boyutlu talaştır. Talaş miktarı için 1. seviye 10 gr, 2. seviye 12,5 gr ve 3. seviye 15 gr ‘dır. Kuvvet Miktarı içinse 1,2 ve 3. seviyeler sırasıyla 5500 kgf, 6500 kgf ve 7500 kgf şeklinde sıralanabilir. Tablo 3.1 ‘e göre kalıp geometrisi için en yüksek yoğunluk değerine dairesel kalıpta ulaşılmıştır. Ayrıca ince talaş boyutu, 15 gr talaş miktarı ve 7500 kgf yük en iyi parametrelerdir. Faktörün sonuç üzerindeki etkisini ifade eden Sinyal/Gürültü (S/N) oranı esas alınarak faktörlerin etki değeri Şekil 3.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. AISI 1040 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri

Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılırken en iyi yoğunluk değerinin, S/N oranının en büyük değerini alması durumunda gerçekleşeceği kabulü yapılmıştır. Bu kabule göre Şekil 3.1 ‘de de belirtildiği gibi kalıp geometrisi için en büyük yoğunluk değeri S/N oranının 9,223 olduğu dairesel kalıptır. Talaş boyutu için kalın, talaş miktarı için 15 gr ve kuvvet miktarı için 7500 kgf olduğu Tablo 3.1 de verilmiş olan S/N oranlarında da görülmektedir.

Taguchi metodunun tahmin ile ilgili özelliği kullanıldığında faktörlerin en iyi seviyeleri Tablo 3.2 de verilmiştir. Tablo 3.3 de ise Anova yöntemiyle yapılan varyans analizi neticesinde $p < 0,05$ değerine göre istatistiksel açıdan en anlamlı sonucun Kuvvet Miktarı faktörüne ait olduğu belirtilmiştir.

Tablo 3.2. Taguchi tahmin değeri (AISI 1040 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı (gr)	Kuvvet Miktarı (kgf)
Dairesel	Kalın	15,0	7500

Tablo 3.3. Anova ile varyans analizi sonuçları (AISI 1040 için)

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kalıp Geometrisi	2	0,02922	0,01461	0,45	0,657
Hata	6	0,19410	0,03235		
Toplam	8	0,22331			
Talaş Boyutu	2	0,002742	0,001371	0,04	0,964
Hata	6	0,220572	0,036762		
Toplam	8	0,223314			
Talaş Miktarı	2	0,006570	0,003285	0,09	0,914
Hata	6	0,216744	0,036124		
Toplam	8	0,223314			
Kuvvet Miktarı	2	0,18479	0,092393	14,39	0,005
Hata	6	0,03853	0,006422		
Toplam	8	0,22331			

Regresyon yapılarak elde edilen kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri Tablo 3.4 de verilmiştir. Denklemler kalıp geometrisi, talaş boyutu ve miktarına göre sıralanmıştır.

Tablo 3.4. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (AISI 1040 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Denklem
Kare	Kalın	10,0	Yoğunluk = 1,5986 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	12,5	Yoğunluk = 1,6553 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	15,0	Yoğunluk = 1,6565 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	10,0	Yoğunluk = 1,5562 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	12,5	Yoğunluk = 1,6130 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	15,0	Yoğunluk = 1,6141 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	10,0	Yoğunluk = 1,5824 + 0,000175 Kuvvet Miktarı

Tablo 3.4 (devam)

Kare	İnce	12,5	Yoğunluk = 1,6391 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	15,0	Yoğunluk = 1,6402 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	10,0	Yoğunluk = 1,6832 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	12,5	Yoğunluk = 1,7399 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	15,0	Yoğunluk = 1,7411 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	10,0	Yoğunluk = 1,6408 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	12,5	Yoğunluk = 1,6976 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	15,0	Yoğunluk = 1,6987 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	10,0	Yoğunluk = 1,6670 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	12,5	Yoğunluk = 1,7237 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	15,0	Yoğunluk = 1,7248 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	10,0	Yoğunluk = 1,7370 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	12,5	Yoğunluk = 1,7938 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	15,0	Yoğunluk = 1,7949 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	10,0	Yoğunluk = 1,6947 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	12,5	Yoğunluk = 1,7514 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	15,0	Yoğunluk = 1,7525 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	10,0	Yoğunluk = 1,7208 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	12,5	Yoğunluk = 1,7775 + 0,000175 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	15,0	Yoğunluk = 1,7787 + 0,000175 Kuvvet Miktarı

Bu denklemlerin tamamını yine regresyon yöntemi kullanılarak denklem 3.1 de verilmiş ortak bir denklem ile izah etmek mümkündür. Bu denklemde kuvvet kgf, yoğunluk birimi ise gr/cm^3 'tür. Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımı ve Anova varyans analizi neticesinde anlamlılık açısından en etkili parametre olan kuvvet denklemde bağımsız değişken olarak ifade edilmiştir.

$$\rho = 1,692 + 0,000175 \times F \quad (3.1)$$

3.1.2. AA7075 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi Sonuçları

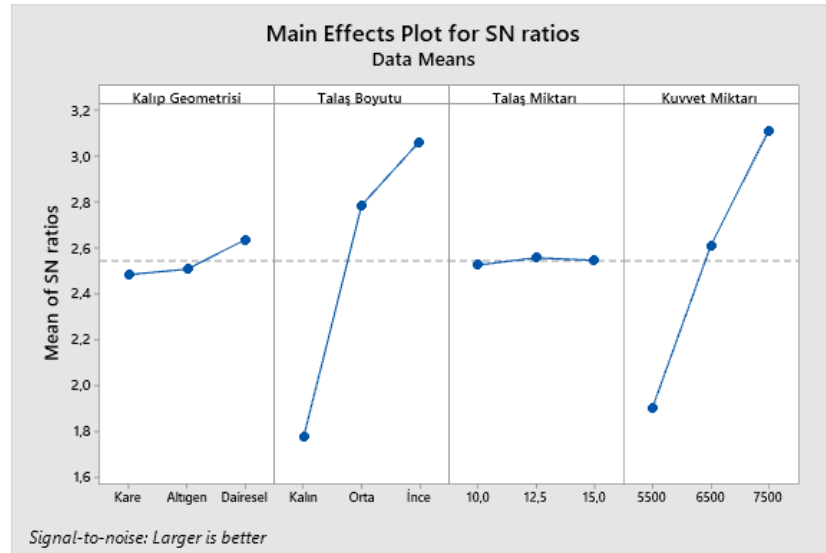
Tablo 3.5 de Taguchi metodu ile tasarlanmış deneylerde yoğunluk değerleri sonuç kriteri olarak belirlendiğinde faktör ve seviyelerin sonuç üzerindeki etki sıralaması verilmiştir.

Tablo 3.5. AA7075 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması

	Kalıp	Talaş	Talaş	Kuvvet
Seviye	Geometrisi	Boyutu	Miktarı	Miktarı
1	2,484	1,778	2,526	1,902
2	2,508	2,787	2,558	2,612
3	2,638	3,066	2,546	3,116
Fark	0,153	1,288	0,031	1,214
Sıralama	3	1	4	2

Tablo 3.5 ‘e göre en etkili faktör talaş boyutu, etki oranı en az olan faktör ise talaş miktarıdır. Tabloda bir faktörün en büyük ve en küçük S/N değerleri arasındaki fark ne kadar büyük ise, o faktör bağıl değişken olan yoğunluğu diğer faktörlere nispeten daha fazla etkilemektedir. Sonuç üzerindeki etkilerine göre faktörler sıralandığında en etkin değer 1 olarak belirtilmiş olan talaş boyutudur. En düşük etki değerine sahip faktör ise 4. olarak belirtilmiş olan talaş miktarıdır.

Bu sıralama Tablo 3.5 de en alt satırda gösterilmiştir. Bu tabloda kalıp geometrisi için 1. seviye kare, 2. seviye altıgen ve 3. seviye dairesel geometridir. Talaş boyutu için 1. seviye kalın, 2. seviye orta ve 3. seviye ince boyutlu talaştır. Talaş miktarı için 1. seviye 10 gr, 2. seviye 12,5 gr ve 3. seviye 15 gr ‘dır. Kuvvet Miktarı içinse 1,2 ve 3. seviyeler sırasıyla 5500 kgf, 6500 kgf ve 7500 kgf şeklinde sıralanabilir. Tablo 3.5 ‘e göre kalıp geometrisi için en yüksek yoğunluk değerine dairesel kalıpta ulaşılmıştır. Ayrıca ince talaş boyutu, 12,5 gr talaş miktarı ve 7500 kgf yük en iyi parametrelerdir. Faktörün sonuç üzerindeki etkisini ifade eden Sinyal/Gürültü (S/N) oranı esas alınarak faktörlerin etki değeri Şekil 3.2 de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. AA7075 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri

Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılırken en iyi yoğunluk değerinin, S/N oranının en büyük değerini alması durumunda gerçekleşeceği kabulü yapılmıştır. Bu kabule göre Şekil 3.2 'de de belirtildiği gibi kalıp geometrisi için en büyük yoğunluk değeri S/N oranının 2,638 olduğu dairesel kalıptır. Talaş boyutu için ince, talaş miktarı için 12,5 gr ve kuvvet miktarı için 7500 kgf olduğu Tablo 3.5 de verilmiş olan S/N oranlarında da görülmektedir.

Taguchi metodunun tahmin ile ilgili özelliği kullanıldığında faktörlerin en iyi seviyeleri Tablo 3.6 da verilmiştir. Tablo 3.7 de ise Anova yöntemiyle yapılan varyans analizi neticesinde, $p < 0,05$ değerine göre istatistiksel açıdan anlamlı sonucun faktörlerin hiçbirinde görülmediği belirtilmiştir.

Tablo 3.6. Taguchi tahmin değeri (AA7075 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	12,5	7500

Tablo 3.7 de Anova yöntemiyle yapılan varyans analizi neticesinde $p < 0,05$ değerine göre istatistiksel açıdan anlamlı bir sonuca ulaşamadığı gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Anova ile varyans analizi sonuçları (AA7075 için)

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kalıp Geometrisi	2	0,000804	0,000402	0,02	0,979
Hata	6	0,115651	0,019275		
Toplam	8	0,116455			
Talaş Boyutu	2	0,06318	0,031591	3,56	0,096
Hata	6	0,05327	0,008879		
Toplam	8	0,11646			
Talaş Miktarı	2	0,000029	0,000014	0,00	0,999
Hata	6	0,116427	0,019404		
Toplam	8	0,116455			
Kuvvet Miktarı	2	0,05244	0,02622	2,46	0,166
Hata	6	0,06401	0,01067		
Toplam	8	0,11646			

Regresyon yapılarak elde edilen kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri Tablo 3.8 de verilmiştir. Denklemler kalıp geometrisi, talaş boyutu ve miktarına göre sıralanmıştır. Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımı ve Anova varyans analizi neticesinde anlamlılık açısından en etkili parametre olan kuvvet denklemde bağımsız değişken olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.8. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (AA7075 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Denklem
Kare	Kalın	10,0	Yoğunluk = $0,6208 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	12,5	Yoğunluk = $0,6165 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	15,0	Yoğunluk = $0,6194 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	10,0	Yoğunluk = $0,7725 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	12,5	Yoğunluk = $0,7682 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	15,0	Yoğunluk = $0,7710 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	10,0	Yoğunluk = $0,8164 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	12,5	Yoğunluk = $0,8121 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	15,0	Yoğunluk = $0,8150 + 0,000093$ Kuvvet Miktarı

Tablo 3.8. (devam)

Altıgen	Kalın	10,0	Yoğunluk = 0,6164 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	12,5	Yoğunluk = 0,6121 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	15,0	Yoğunluk = 0,6149 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	10,0	Yoğunluk = 0,7680 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	12,5	Yoğunluk = 0,7637 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	15,0	Yoğunluk = 0,7666 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	10,0	Yoğunluk = 0,8120 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	12,5	Yoğunluk = 0,8077 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	15,0	Yoğunluk = 0,8105 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	10,0	Yoğunluk = 0,6383 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	12,5	Yoğunluk = 0,6340 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	15,0	Yoğunluk = 0,6368 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	10,0	Yoğunluk = 0,7899 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	12,5	Yoğunluk = 0,7856 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	15,0	Yoğunluk = 0,7885 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	10,0	Yoğunluk = 0,8339 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	12,5	Yoğunluk = 0,8296 + 0,000093 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	15,0	Yoğunluk = 0,8324 + 0,000093 Kuvvet Miktarı

Bu denklemlerin tamamını yine regresyon yöntemi kullanılarak denklem 3.2 de verilmiş ortak bir denklem ile izah etmek mümkündür. Bu denklemde kuvvet kgf, yoğunluk birimi ise gr/cm^3 'tür.

$$\rho = 0,739 + 0,000093 \times F \quad (3.2)$$

3.1.3. Ms62 için Taguchi Metodu ve Anova Analizi

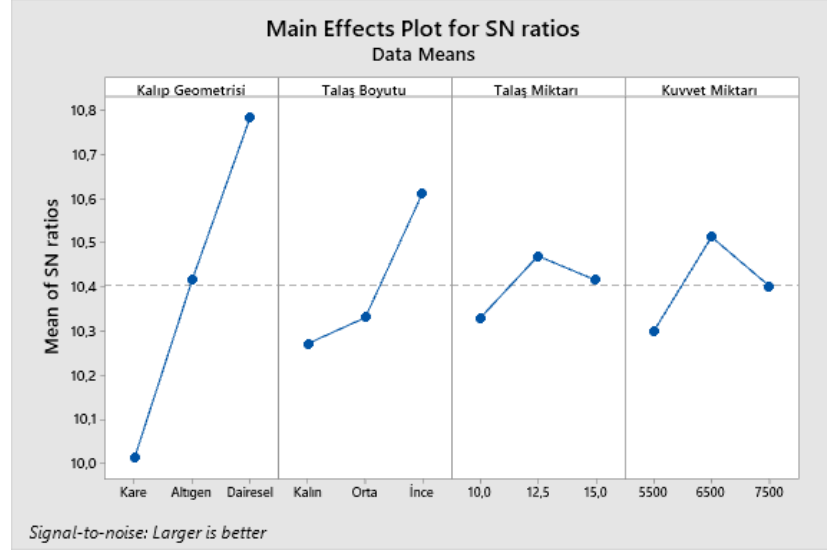
Tablo 3.9 da Taguchi metodu ile tasarlanmış deneylerde yoğunluk değerleri sonuç kriteri olarak belirlendiğinde faktör ve seviyelerin sonuç üzerindeki etki sıralaması verilmiştir.

Tablo 3.9. Ms62 için faktör ve seviyelerin etki sıralaması

	Kalıp	Talaş	Talaş	Kuvvet
Seviye	Geometrisi	Boyutu	Miktarı	Miktarı
1	10,01	10,27	10,33	10,30
2	10,42	10,33	10,47	10,51
3	10,78	10,61	10,42	10,40
Fark	0,77	0,34	0,14	0,21
Sıralama	1	2	4	3

Tablo 3.9 ‘a göre en etkili faktör kalıp geometrisi, etki oranı en az olan faktör ise talaş miktarıdır. Tabloda bir faktörün en büyük ve en küçük S/N değerleri arasındaki fark ne kadar büyük ise, o faktör bağıl değişken olan yoğunluğu diğer faktörlere nispeten daha fazla etkilemektedir. Sonuç üzerindeki etkilerine göre faktörler sıralandığında en etkin değer 1. olarak belirtilmiş olan kalıp geometrisidir. En düşük etki değerine sahip faktör ise 4. olarak belirtilmiş olan talaş miktarıdır.

Bu sıralama Tablo 3.9 da en alt satırda gösterilmiştir. Bu tabloda kalıp geometrisi için 1. seviye kare, 2. seviye altıgen ve 3. seviye dairesel geometridir. Talaş boyutu için 1. seviye kalın, 2. seviye orta ve 3.seviye ince boyutlu talaştır. Talaş miktarı için 1. seviye 10 gr, 2. seviye 12,5 gr ve 3. seviye 15 gr ‘dır. Kuvvet Miktarı içinse 1,2 ve 3. seviyeler sırasıyla 5500 kgf, 6500 kgf ve 7500 kgf şeklinde sıralanabilir. Tablo 3.9 ‘a göre kalıp geometrisi için en yüksek yoğunluk değerine dairesel kalıpta ulaşılmıştır. Ayrıca ince talaş boyutu, 12,5 gr talaş miktarı ve 6500 kgf yük en iyi parametrelerdir. Faktörün sonuç üzerindeki etkisini ifade eden Sinyal/Gürültü (S/N) oranı esas alınarak faktörlerin etki değeri Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Ms62 için S/N oranına göre faktörlerin yoğunluğa etkileri

Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılırken en iyi yoğunluk değerinin, S/N oranının en büyük değerini alması durumunda gerçekleşeceği kabulü yapılmıştır. Bu kabule göre Şekil 3.3 'de de belirtildiği gibi kalıp geometrisi için en büyük yoğunluk değeri S/N oranının 10,7849 olduğu dairesel kalıptır. Talaş boyutu için ince, talaş miktarı için 12,5 gr ve kuvvet miktarı için 6500 kgf olduğu Tablo 3.9 da verilmiş olan S/N oranlarında da görülmektedir.

Taguchi metodunun tahmin ile ilgili özelliği kullanıldığında faktörlerin en iyi seviyeleri Tablo 3.10 da verilmiştir. Tablo 3.11 de ise Anova yöntemiyle yapılan varyans analizi neticesinde, $p < 0,05$ değerine göre istatistiksel açıdan anlamlı sonucun kalıp geometrisinde görüldüğü belirtilmiştir.

Tablo 3.10. Taguchi tahmin değeri (Ms62 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	12,5	6500

Tablo 3.11 de Anova yöntemiyle yapılan varyans analizi neticesinde $p < 0,05$ değerine göre istatistiksel açıdan en anlamlı sonuca 0,015 ile dairesel kalıpta ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 3.11. Anova ile varyans analizi sonuçları (Ms62 için)

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kalıp Geometrisi	2	0,12955	0,064776	9,22	0,015
Hata	6	0,04214	0,007023		
Toplam	8	0,17169			
Talaş Boyutu	2	0,02889	0,01444	0,61	0,575
Hata	6	0,14280	0,02380		
Toplam	8				
Talaş Miktarı	2	0,004115	0,002058	0,07	0,930
Hata	6	0,167574	0,027929		
Toplam	8				
Kuvvet Miktarı	2	0,009135	0,004568	0,17	0,849
Hata	6	0,162554	0,027092		
Toplam	8				

Regresyon yapılarak elde edilen kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri Tablo 3.12 de verilmiştir. Denklemler kalıp geometrisi, talaş boyutu ve miktarına göre sıralanmıştır. Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımı ve Anova varyans analizi neticesinde anlamlılık açısından en etkili parametre olan kuvvet denklemde bağımsız değişken olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.12. Kuvvete bağlı yoğunluk denklemleri (Ms62 için)

Kalıp Geometrisi	Talaş Boyutu	Talaş Miktarı	Denklem
Kare	Kalın	10,0	Yoğunluk = 2,981+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	12,5	Yoğunluk = 3,033+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	Kalın	15,0	Yoğunluk = 3,011+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	10,0	Yoğunluk = 3,000+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	12,5	Yoğunluk = 3,052+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	Orta	15,0	Yoğunluk = 3,030+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	10,0	Yoğunluk = 3,110+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	12,5	Yoğunluk = 3,162+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Kare	İnce	15,0	Yoğunluk = 3,139+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	10,0	Yoğunluk = 3,132+ 0,000017 Kuvvet Miktarı

Tablo 3.12 (devam)

Altıgen	Kalın	12,5	Yoğunluk = 3,184+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Kalın	15,0	Yoğunluk = 3,162+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	10,0	Yoğunluk = 3,151+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	12,5	Yoğunluk = 3,203+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	Orta	15,0	Yoğunluk = 3,181+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	10,0	Yoğunluk = 3,260+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	12,5	Yoğunluk = 3,313+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Altıgen	İnce	15,0	Yoğunluk = 3,290+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	10,0	Yoğunluk = 3,275+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	12,5	Yoğunluk = 3,327+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Kalın	15,0	Yoğunluk = 3,305+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	10,0	Yoğunluk = 3,294+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	12,5	Yoğunluk = 3,346+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	Orta	15,0	Yoğunluk = 3,324+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	10,0	Yoğunluk = 3,404+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	12,5	Yoğunluk = 3,456+ 0,000017 Kuvvet Miktarı
Dairesel	İnce	15,0	Yoğunluk = 3,433+ 0,000017 Kuvvet Miktarı

Bu denklemlerin tamamını yine regresyon yöntemi kullanılarak denklem 3.3 de verilmiş ortak bir denklem ile izah etmek mümkündür. Bu denklemde kuvvet kgf, yoğunluk birimi ise gr/cm³ ‘tür.

$$\rho = 3,206 + 0,000017 \text{ Kuvvet Miktarı} \quad (3.3)$$

3.2. Deneysel Metot

Taguchi deney tasarımında belirlenmiş olan 9 adet deney kompozisyonu 3 er defa tekrarlanarak AISI 1040, AA7075 ve Ms62 malzemeleri için uygulanmıştır. Bölüm 3.2.1, 3.2.2 ve 3.2.3 de numune görselleri verilmiş, elde edilen bulgular detaylı olarak izah edilmiştir.

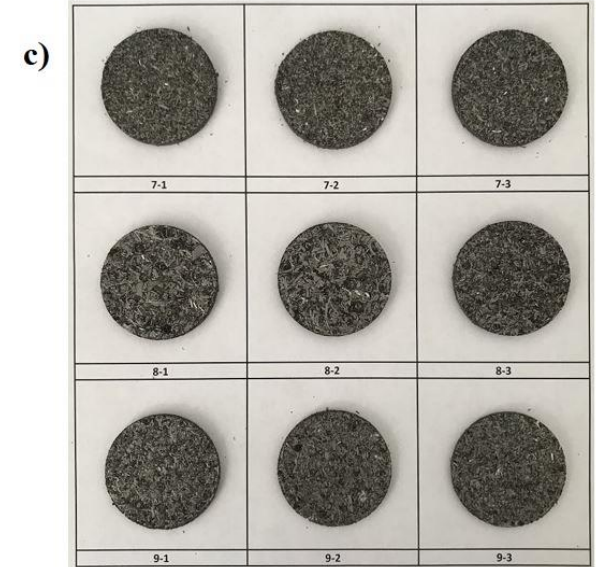
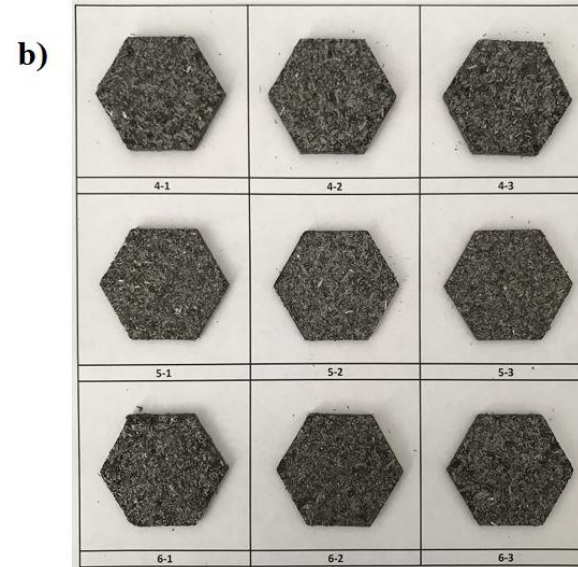
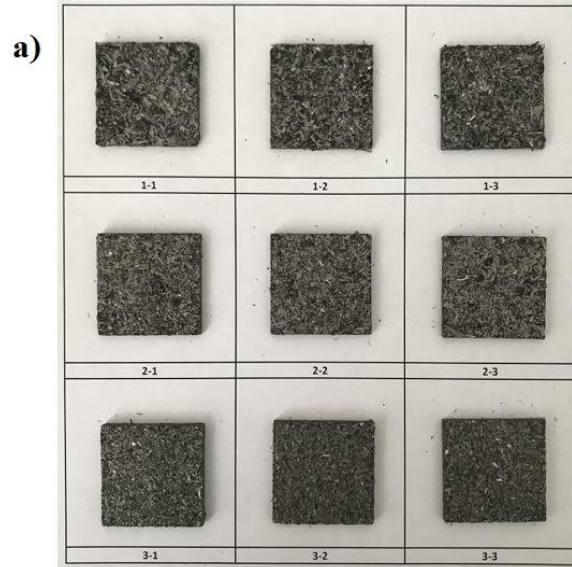
3.2.1. AISI 1040 Talaşı Baskı Numuneleri

Şekil 3.4 de sıkıştırma sonrası oluşan kare, altıgen ve dairesel geometrili AISI 1040 talaşından üretilmiş numuneler gösterilmiştir. Her bir numune deney tasarımında verilen sırada gösterilmiştir.

Tablo 3.13 de AISI 1040 talaşlarının Taguchi deney tasarımına göre yapılan sıkıştırma işlemi sonucunda hesaplanmış yoğunluk değerleri verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri olan 2,56 gr/cm³ kare kalıpta bulunmuştur. En büyük yoğunluk değeri ise altıgen kalıpta ve 3,05 gr/cm³ büyüklüğündedir. h_s değeri numunenin ölçülen kalınlığıdır. Δh değeri basma test cihazından elde edilen zımba ilerleme miktarıdır. h_i değeri ise h_s ve Δh 'ın toplamına eşittir.

Optimize edilmiş en iyi değer bir önceki bölümde, Tablo 3.2 de verilmiştir. Buna göre en iyi sıkıştırma deneyi kompozisyonu dairesel kalıpta 7500 kgf yük altında 15 gr kalın talaşa uygulandığında bulunacaktır. Tablo 3.14 de görüldüğü gibi en iyi sonucu vereceği tahmin edilen numuneler basma test cihazında bu kombinasyonda sıkıştırılarak elde edilmiştir. Buna göre deney tasarımı ile ortaya konmuş olan 9 adet deney numunesinde belirlenmiş en yüksek yoğunluk değeri 3,05 gr/cm³ 'tür. Tahmin değerinde ise bu değer 3,05 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Buradan da anlaşıldığı gibi tahmin edilen deney kompozisyonu doğrulanmıştır. Ancak bulunan yoğunluk değerinde pozitif yönde artış görülmemiştir. Kalitede stabiliteyi sağlaması açısından önemli bulunabilecek bir sonuçtur.

Hacimsel doluluk oranı için en iyi değer deney tasarımı aşamasında % 39'dur. Tahmin edilen deneyde ise bu sonuç ortalama % 38,70'dir. İki sonuç birbirine yakındır. Ancak daha yüksek değerde çıkması beklenen bir sonuca ulaşamamıştır.



Şekil 3.4. AISI 1040 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel

Tablo 3.13. AISI 1040 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri

Numune No	Kalıp Taban Alanı (mm ²)	V _{dolu} (cm ³)	h _i (mm)	Δh (mm)	h _s (mm)	m _{numune} (gr)	V _{numune} (cm ³)	V _{boşluk} (cm ³)	ρ (gr/cm ³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	ρ _{ort} (gr/cm ³)
1-1	1225	1,27	15,13	11,97	3,16	9,82	3,87	2,60	2,5368		
1-2	1225	1,27	13,14	9,86	3,28	9,9	4,02	2,75	2,4639	32,82%	2,56
1-3	1225	1,27	13,01	9,95	3,06	9,99	3,75	2,48	2,6651		
2-1	1225	1,59	15,08	11,46	3,62	12,38	4,43	2,84	2,7917		
2-2	1225	1,59	15,43	11,76	3,67	12,44	4,50	2,91	2,7671	35,38%	2,76
2-3	1225	1,59	14,72	11	3,72	12,46	4,56	2,97	2,7343		
3-1	1225	1,91	17,19	13,04	4,15	14,9	5,08	3,18	2,9309		
3-2	1225	1,91	16,95	12,85	4,1	14,92	5,02	3,11	2,9706	37,72%	2,95
3-3	1225	1,91	16,65	12,51	4,14	14,91	5,07	3,16	2,9400		
4-1	1235	1,91	17,28	12,71	4,57	14,97	5,60	3,69	2,6740		
4-2	1235	1,91	18,01	13,4	4,61	14,98	5,65	3,74	2,6526	33,84%	2,66
4-3	1235	1,91	17,90	13,27	4,63	14,97	5,67	3,76	2,6394		
5-1	1235	1,27	11,78	8,92	2,86	9,97	3,50	2,23	2,8457		
5-2	1235	1,27	11,51	8,58	2,93	9,98	3,59	2,32	2,7805	35,94%	2,82
5-3	1235	1,27	11,28	8,4	2,88	9,98	3,53	2,26	2,8288		
6-1	1235	1,59	13,82	10,55	3,27	12,34	4,01	2,42	3,0806		
6-2	1235	1,59	14,25	10,93	3,32	12,44	4,07	2,48	3,0588	39,00%	3,05

Tablo 3.13. (devam)

6-3	1235	1,59	14,82	11,42	3,4	12,5	4,17	2,57	3,0012		
7-1	1235	1,59	12,82	9,2	3,62	12,45	4,43	2,84	2,8075		
7-2	1235	1,59	13,03	9,3	3,73	12,4	4,57	2,98	2,7138	35,07%	2,73
7-3	1235	1,59	13,86	10,1	3,76	12,35	4,61	3,02	2,6813		
8-1	1235	1,91	18,59	14,46	4,13	14,99	5,06	3,15	2,9629		
8-2	1235	1,91	19,04	14,88	4,16	14,98	5,10	3,19	2,9396	37,51%	2,95
8-3	1235	1,91	17,61	13,44	4,17	15	5,11	3,20	2,9364		
9-1	1235	1,27	12,66	9,92	2,74	10,03	3,36	2,08	2,9882		
9-2	1235	1,27	12,00	9,28	2,72	10	3,33	2,06	3,0012	38,14%	3,00
9-3	1235	1,27	12,56	9,85	2,71	10,01	3,32	2,05	3,0153		

Tablo 3.14. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (AISI 1040)

Numune No	Kalıp Taban Alanı (mm²)	V_{dolu} (cm³)	h_i (mm)	Δh (mm)	h_s (mm)	m_{numune} (gr)	V_{numune} (cm³)	V_{boşluk} (cm³)	ρ (gr/cm³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	ρ_{ort} (gr/cm³)
1-1	1235	1,91	18,17	14,2	3,97	15,14	4,90	2,99	3,0879	38,92%	
1-2	1235	1,91	17,93	13,91	4,02	14,98	4,96	3,06	3,0173	38,44%	3,05
1-3	1235	1,91	19,61	15,62	3,99	15,00	4,93	3,02	3,0440	38,73%	

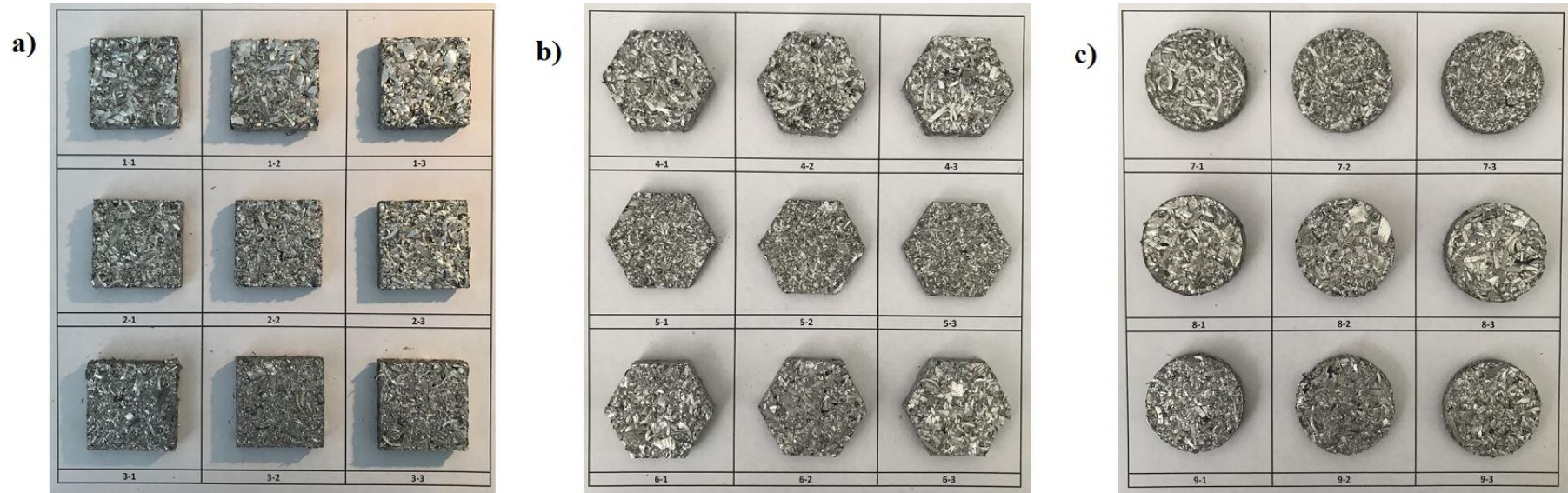
3.2.2. AA7075 Talaşı Baskı Numuneleri

AA7075 talaşlarının sıkıştırma işlemi sonrasında oluşan kare, altıgen ve dairesel numuneler Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Numuneler geometrik şekillerine göre ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi her bir numune için deney 3 defa tekrar edilmiştir.

Şeklin devamında yer alan Tablo 3.15 de ise AA7075 talaşlarının Taguchi deney tasarımına göre yapılan sıkıştırma işlemi sonucunda hesaplanmış yoğunluk değerleri verilmiştir. Bu değer geleneksel yoğunluk denklemi ($\rho=m/V$) ile bulunmuştur. Tabloda yer alan Δh ve h_s değerleri cihazdan alınan veriler ve ölçülen büyüklüklerdir. h_s değeri numunenin ölçülen kalınlığıdır. Δh değeri basma test cihazından elde edilen zımba ilerleme miktarıdır. h_i değeri ise h_s ve Δh 'ın toplamına eşittir.

Optimize edilmiş en iyi değer bir önceki bölümde, Tablo 3.6 da verilmiştir. Buna göre en iyi sıkışma deneyi kompozisyonu dairesel kalıpta 7500 kgf yük altında 12,5 gr ince talaşa uygulandığında bulunacaktır. Tablo 3.16 de görüldüğü gibi en iyi sonucu vereceği tahmin edilen numuneler basma test cihazında bu kombinasyonda sıkıştırılarak elde edilmiştir. Buna göre deney tasarımı ile ortaya konmuş olan 9 adet deney numunesinde belirlenmiş en yüksek yoğunluk değeri $1,51 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Tahmin değerinde ise bu değer $1,58 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Buradan da anlaşıldığı gibi tahmin edilen deney kompozisyonu doğrulanmıştır. Ve en iyi sonucu vermiştir.

Hacimsel doluluk oranı için en iyi değer deney tasarımı aşamasında % 19,43'tür. Tahmin edilen deneyde ise bu sonuç ortalama % 24,11 mertebesine ulaşmıştır. Daha dolu bir sıkıştırmanın oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.5. AA7075 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel

Tablo 3.15. AA7075 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri

Numune No	Kalıp Taban Alanı (mm ²)	V _{dolu} (cm ³)	h _i (mm)	Δh (mm)	h _s (mm)	m _{numune} (gr)	V _{numune} (cm ³)	V _{boşluk} (cm ³)	ρ (gr/cm ³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	ρ _{ort} (gr/cm ³)
1-1	1225	1,27	32,17	25,14	7,03	9,84	8,61	7,34	1,1426		
1-2	1225	1,27	33,06	26,04	7,02	9,75	8,60	7,33	1,1338	14,68	1,13
1-3	1225	1,27	29,49	22,31	7,18	9,79	8,80	7,52	1,1131		
2-1	1225	1,59	30,96	23,69	7,27	12,28	8,91	7,32	1,3789		
2-2	1225	1,59	29,11	21,79	7,32	12,62	8,97	7,38	1,4074	17,72	1,38
2-3	1225	1,59	31,61	24,22	7,39	12,31	9,05	7,46	1,3598		
3-1	1225	1,91	26,83	19,36	7,47	14,78	9,15	7,24	1,6152		
3-2	1225	1,91	25,92	17,8	8,12	14,86	9,95	8,04	1,4939	19,43	1,51
3-3	1225	1,91	28,45	19,91	8,54	14,88	10,46	8,55	1,4224		
4-1	1235	1,91	34,04	24,56	9,48	14,85	11,61	9,70	1,2787		
4-2	1235	1,91	31,12	21,75	9,37	14,84	11,48	9,57	1,2929	16,50	1,28
4-3	1235	1,91	32,23	22,76	9,47	14,56	11,60	9,69	1,2551		
5-1	1235	1,27	18,27	12,65	5,62	9,89	6,88	5,61	1,4366		
5-2	1235	1,27	18,56	12,89	5,67	9,85	6,95	5,67	1,4181	18,40	1,43
5-3	1235	1,27	16,43	10,79	5,64	9,83	6,91	5,64	1,4228		
6-1	1235	1,59	33,74	25,93	7,81	12,32	9,57	7,98	1,2877		
6-2	1235	1,59	33,04	25,43	7,61	12,42	9,32	7,73	1,3323	16,83	1,31

Tablo 3.15. (devam)

6-3	1235	1,59	33,52	25,8	7,72	12,32	9,46	7,87	1,3027		
7-1	1235	1,59	22,97	15,4	7,57	12,4	9,27	7,68	1,3372		
7-2	1235	1,59	24,15	16,62	7,53	12,34	9,22	7,63	1,3378	17,17	1,34
7-3	1235	1,59	21,23	13,65	7,58	12,45	9,29	7,70	1,3408		
8-1	1235	1,91	38,52	29,05	9,47	14,44	11,60	9,69	1,2447		
8-2	1235	1,91	37,00	27,32	9,68	14,76	11,86	9,95	1,2447	16,30	1,25
8-3	1235	1,91	29,92	20,39	9,53	14,74	11,67	9,77	1,2626		
9-1	1235	1,27	23,25	17,9	5,35	9,99	6,55	5,28	1,5243		
9-2	1235	1,27	22,81	17,33	5,48	9,72	6,71	5,44	1,4479	19,09	1,49
9-3	1235	1,27	23,38	17,89	5,49	9,98	6,73	5,45	1,4840		

Tablo 3.16. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (AA7075)

Numune Tanımı	Kalıp Taban Alanı (mm²)	Vdolu (cm³)	h_i (mm)	Δh (mm)	h_s (mm)	m_{numune} (gr)	V_{numune} (cm³)	V_{boşluk} (cm³)	ρ (gr/cm³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	port (gr/cm³)
1-1	1235	1,91	21,01	14,68	6,33	12,51	7,75	5,85	1,6133	24,61	
1-2	1235	1,91	22,44	15,91	6,53	12,50	8,00	6,09	1,5626	23,86	1,58
1-3	1235	1,91	21,73	15,2	6,53	12,50	8,00	6,09	1,5626	23,86	

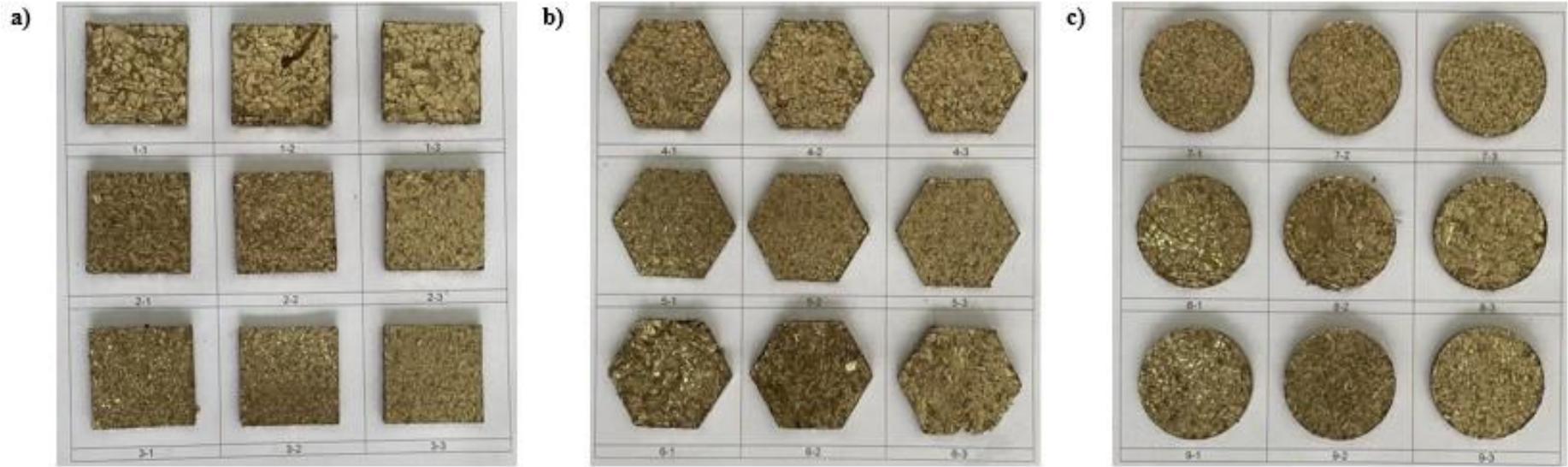
3.2.3. Ms62 Talaşı Baskı Numuneleri

Ms62 talaşlarının sıkıştırma işlemi sonrasında oluşan kare, altıgen ve dairesel numuneler Şekil 3.6 da gösterilmiştir. Numuneler geometrik şekillerine göre ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi her bir numune için deney 3 defa tekrar edilmiştir.

Şeklin devamında yer alan Tablo 3.17 de ise Ms62 talaşlarının Taguchi deney tasarımına göre yapılan sıkıştırma işlemi sonucunda hesaplanmış yoğunluk değerleri verilmiştir. Bu değer geleneksel yoğunluk denklemi ($\rho=m/V$) ile bulunmuştur. Tabloda yer alan Δh ve h_s değerleri cihazdan alınan veriler ve ölçülen büyüklüklerdir. h_s değeri numunenin ölçülen kalınlığıdır. Δh değeri basma test cihazından elde edilen zımba ilerleme miktarıdır. h_i değeri ise h_s ve Δh 'ın toplamına eşittir.

Optimize edilmiş en iyi değer bir önceki bölümde, Tablo 3.10 da verilmiştir. Buna göre en iyi sıkışma deneyi kompozisyonu dairesel kalıpta 6500 kgf yük altında 12,5 gr ince talaşa uygulandığında bulunacaktır. Tablo 3.18 de görüldüğü gibi en iyi sonucu vereceği tahmin edilen numuneler basma test cihazında bu kombinasyonda sıkıştırılarak elde edilmiştir. Buna göre deney tasarımı ile ortaya konmuş olan 9 adet deney numunesinde belirlenmiş en yüksek yoğunluk değeri 3,53 gr/cm³ 'tür. Tahmin değerinde ise bu değer 3,61 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Buradan da anlaşıldığı gibi tahmin edilen deney kompozisyonu doğrulanmıştır. Ve en iyi sonucu vermiştir.

Hacimsel doluluk oranı için en iyi değer deney tasarımı aşamasında % 41,90'tür. Tahmin edilen deneyde ise bu sonuç ortalama % 43,21 mertebesine ulaşmıştır. Daha dolu bir sıkıştırmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6. Ms62 numuneleri, (a) Kare; (b) Altıgen; (c) Dairesel

Tablo 3.17. Ms62 baskı numunesine ait hacim ve yoğunluk değerleri

Numune No	Kalıp Taban Alanı (mm ²)	V _{dolu} (cm ³)	h _i (mm)	Δh (mm)	h _s (mm)	m _{numune} (gr)	V _{numune} (cm ³)	V _{boşluk} (cm ³)	ρ (gr/cm ³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	ρ _{ort} (gr/cm ³)
1-1	1225	1,19	12,58	9,85	2,73	9,91	3,34	2,16	2,9633	36,46	3,05
1-2	1225	1,19	11,82	9,17	2,65	9,95	3,25	2,06	3,0651		
1-3	1225	1,19	12,09	9,48	2,61	10,02	3,20	2,01	3,1339		
2-1	1225	1,49	13,63	10,51	3,12	12,52	3,82	2,34	3,2758	38,13	3,20
2-2	1225	1,49	13,84	10,67	3,17	12,46	3,88	2,40	3,2087		
2-3	1225	1,49	13,64	10,38	3,26	12,48	3,99	2,51	3,1251		
3-1	1225	1,78	15,41	11,74	3,67	15,02	4,50	2,71	3,3409	38,58	3,25
3-2	1225	1,78	15,55	11,81	3,74	15,04	4,58	2,80	3,2828		
3-3	1225	1,78	15,85	11,93	3,92	14,96	4,80	3,02	3,1154		
4-1	1235	1,78	16,19	12,35	3,84	14,98	4,70	2,92	3,1845	39,11	3,29
4-2	1235	1,78	16,48	12,7	3,78	15,01	4,63	2,85	3,2416		
4-3	1235	1,78	16,20	12,64	3,56	15,03	4,36	2,58	3,4465		
5-1	1235	1,19	10,04	7,56	2,48	9,97	3,04	1,85	3,2818	38,73	3,25
5-2	1235	1,19	10,15	7,64	2,51	9,99	3,07	1,89	3,2490		
5-3	1235	1,19	10,08	7,55	2,53	10,01	3,10	1,91	3,2298		
6-1	1235	1,49	12,08	9,12	2,96	12,46	3,63	2,14	3,4363	40,58	3,41
6-2	1235	1,49	12,26	9,24	3,02	12,49	3,70	2,21	3,3761		

Tablo 3.17. (devam)

6-3	1235	1,49	12,60	9,61	2,99	12,53	3,66	2,18	3,4209	38,13	3,46
7-1	1235	1,49	11,26	8,14	3,12	12,55	3,82	2,34	3,2836		
7-2	1235	1,49	11,45	8,27	3,18	15,42	3,90	2,41	3,9584		
7-3	1235	1,49	11,84	8,59	3,25	12,44	3,98	2,49	3,1246		
8-1	1235	1,78	15,91	12,36	3,55	14,96	4,35	2,57	3,4401	40,45	3,40
8-2	1235	1,78	16,06	12,45	3,61	14,99	4,42	2,64	3,3897		
8-3	1235	1,78	15,65	12,01	3,64	15,04	4,46	2,68	3,3730		
9-1	1235	1,19	10,82	8,54	2,28	9,96	2,79	1,60	3,5661	41,90	3,53
9-2	1235	1,19	10,82	8,49	2,33	10,06	2,85	1,67	3,5246		
9-3	1235	1,19	10,95	8,61	2,34	10,02	2,87	1,68	3,4956		

Tablo 3.18. Optimize edilmiş deney sonucunun yoğunluk değeri (Ms62)

Numune Tanımı	Kalıp Taban Alanı (mm²)	Vdolu (cm³)	h_i (mm)	Δh (mm)	h_s (mm)	m_{numune} (gr)	V_{numune} (cm³)	V_{boşluk} (cm³)	ρ (gr/cm³)	Hacimsel Doluluk Oranı (%)	port (gr/cm³)
1-1	1235	1,59	17,13	14,15	2,98	12,56	3,68	2,09	3,4128	43,21	3,61
1-2	1235	1,59	17,24	14,23	3,01	15,52	3,72	2,13	4,1750	42,78	
1-3	1235	1,59	17,75	14,65	3,1	12,45	3,83	2,24	3,2519	41,54	

3.3. Matematiksel Metot

Farklı geometrideki kalıplar için türetilmiş olan denklemler Tablo 3.19 da verilmiştir. Deneysel çalışmada farklı üç kalıptaki zımba ilerleme miktarının en yüksek değeri $x=15$ mm olarak bulunmuştur. Bu nedenle tüm kalıplar için zımba ilerleme miktarı $x=15$ mm olarak kabul edilmiştir. Mühendislik problemlerinin tamamında sürtünme katsayısı ve gerilme faktörlerinin büyüklük değerleri 0-1 arasında seçilmektedir. Bu veriler malzemenin türüne göre ilgili tablolardan seçilen bir büyüklüklerdir.

Bu bölümde her bir numune için malzeme tanımlamak yerine tüm kalıp türlerinde sürtünme katsayısı μ ve k değerleri 0,5 olduğu varsayılmıştır. Tüm kalıplarda eşit olduğu varsayılan sürtünme katsayısı ve gerilme faktörleri için 0,5 ten büyük ya da daha küçük bir değerin seçilmesi, üç farklı kalıpta oluşacak P_x basıncının artmasına ya da azalmasına neden olacak ancak kalıplar arasında teorik açıdan yapılacak bu mukayesenin sonuçlarını değiştirmeyecektir.

Ayrıca deneysel çalışmada uygulanan en büyük kuvvet değeri olan 7500 kgf 'un tüm kalıplarda ortak yüzey alanı olan 1235 mm^2 'ye bölünmesi sonucunda, zımba yüzeyinde ve zımbanın temas ettiği numune üzerinde oluşan P_0 basıncı 61 MPa değeri ile tüm kalıp geometrileri için eşit bulunmuş olur. Kalıplar için farklı denklemler ile hesaplanmış P_x basınç değerleri Tablo 3.19 da görüldüğü gibidir.

Tablo 3.19. Farklı kalıp denklemleri ile hesaplanmış P_x basınç büyüklükleri

Numune Şekli	Denklem	D (mm)	a (mm)	b (mm)	μ	k	x (mm)	P_0 (MPa)	P_x (MPa)
Kare	$p_x = p_0 e^{-4\mu kx/b}$	-	-	35	0,5	0,5	15	61	39,74
Altıgen	$p_x = p_0 e^{-4\sqrt{3}\mu kx/3a}$	-	17,80	-	0,5	0,5	15	61	37,50
Daire	$p_x = p_0 e^{-4\mu kx/D}$	39,86	-	-	0,5	0,5	15	61	41,79

Zımbanın her 1 mm ilerlemesine karşılık gelen P_x basıncının kare, altıgen ve dairesel kalıptaki değişim değerleri Tablo 3.20 de belirtilmiştir.

Tablo 3.20. Δh - P_x değişimi

Δh (mm)	P_x Basıncı (MPa)		
	Kare Kalıp	Altıgen Kalıp	Dairesel Kalıp
1	59,28	59,05	59,48
2	57,61	57,17	58,00
3	55,99	55,34	56,56
4	54,41	53,58	55,15
5	52,88	51,87	53,77
6	51,39	50,21	52,44
7	49,94	48,61	51,13
8	48,54	47,06	49,86
9	47,17	45,55	48,62
10	45,84	44,10	47,41
11	44,55	42,69	46,22
12	43,29	41,33	45,07
13	42,07	40,01	43,95
14	40,89	38,73	42,86
15	39,74	37,50	41,79

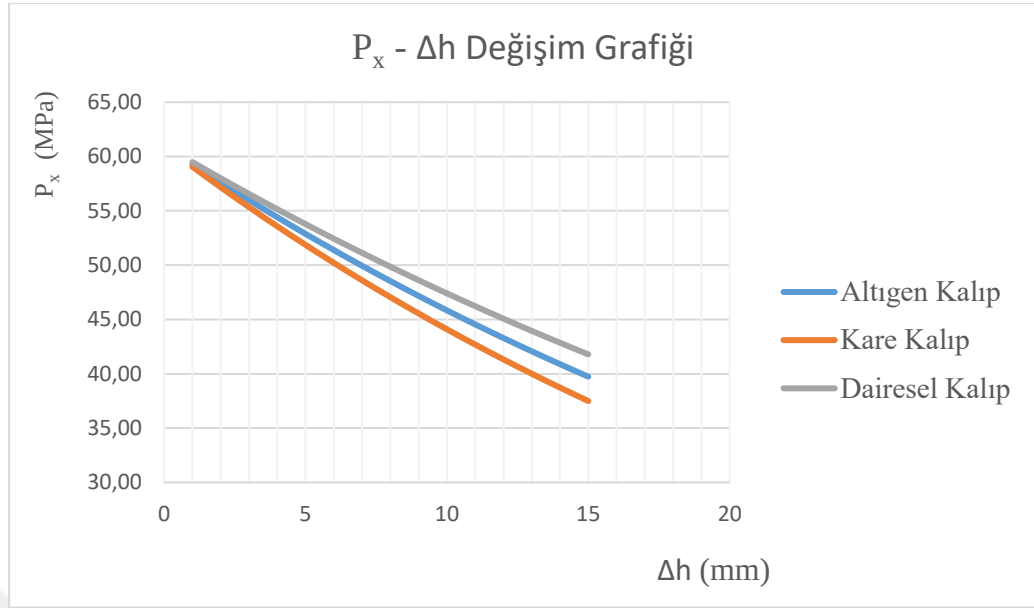
Yan yüzey alanı sürtünme kuvvetini arttıracığından, P_0 basıncına zıt yönde ve şiddetini azaltacak şekilde etki yapmaktadır. Yan yüzey alanı arttıkça sürtünme kuvveti artar ve net basınç değeri P_x azalmış olur. Ancak Tablo 3.19 da verilen denklemlerde üstel değeri küçültten payda değerinin altıgen kalıpta en büyük oluşu P_x basıncının en küçük olmasına neden olmaktadır. Kalıpların yan yüzey alanları mukayese edildiğinde en küçük alana sahip olan kalıbın altıgen kalıp olduğu Tablo 3.21 de belirtilmiştir.

Tablo 3.21. Kalıp geometrilerine bağlı yan yüzey alanı büyüklüğü

Kalıp Geometrisi	Yan Yüzey Alanı Denklemi	b (mm)	a (mm)	D (mm)	Yan Yüzey Alanı (mm ²)
Kare	$4*b*h$	35	-	-	$140*h$
Altıgen	$6*a*h$	-	17,80	-	$106,8*h$
Dairesel	$\pi*D*h$	-	-	39,86	$125,2*h$

Tablo 3.20 de belirtilmiş olan değerler Şekil 3.7 de verilen P_x - Δh grafiğinde çizilmiş eğriler ile gösterilmiştir. Sürtünme kuvvetinin P_0 basıncının etkisini azalttığında ortaya çıkan net basınç ifadesi P_x 'in en büyük olduğu kalıbın daireysel

kalıp olduğu bu grafikte de görülmektedir.



Şekil 3.7. P_x - Δh değişim grafiği

3.4. Sonlu Elemanlar Metodu

Kalıpta sıkıştırıldığı varsayılan dairesel geometrili talaşlar homojen tek parça dolu cisim olarak kabul edilmiştir. Bunun temel sebebi talaşların anizotropik davranış göstermesi, tüm talaşların farklı geometride oluşu ve kalıbın içinde farklı dizilişlerde yerleşmeleridir. AISI 1040, AA7075 ve Ms62 talaşları ayrı ayrı incelenmiştir. Ve tüm talaş malzeme grupları için en yüksek gerilme değerleri, yüzey altı gerilme aralıkları ve şekil değiştirme enerjileri bulunmuştur.

Kalıp içerisinde basılan talaş üzerine etki eden kuvvet neticesinde ortaya çıkan gerilme ve şekil değiştirme enerjileri bölüm 3.4.1, 3.4.2 ve 3.4.3’de verilmiştir.

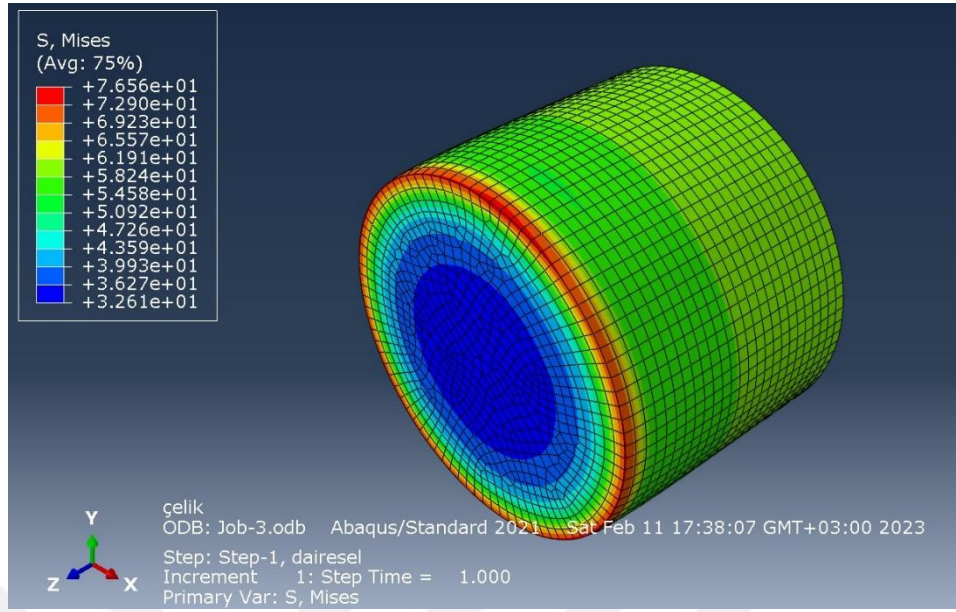
3.4.1. Dairesel Geometri

AISI 1040, AA7075 ve Ms62 malzemeleri için dairesel geometrili homojen cisim esas alınarak yapılan sıkıştırma işlemi ve bu işlem neticesinde oluşan gerilme büyüklükleri ve şekil değiştirme enerjileri bu bölümde izah edilmiştir.

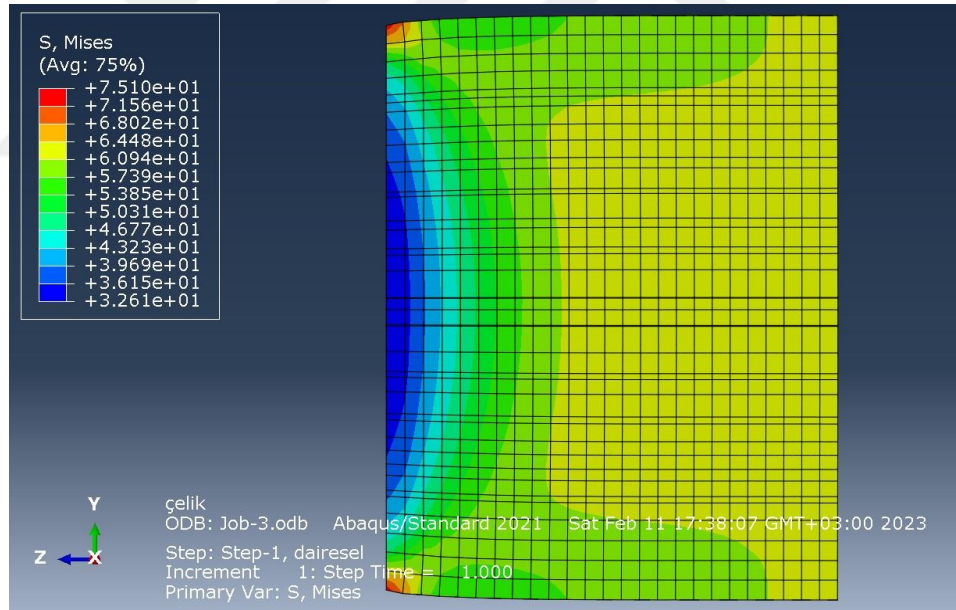
3.4.1.1 AISI 1040 Malzeme

Şekil 3.8 de görüldüğü gibi AISI 1040 malzeme için en yüksek gerilme değeri 76,56 MPa ve en düşük gerilme değeri 32,61 MPa’dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.9 da belirtildiği gibi 71,56 MPa – 32,61 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim

merkezinine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

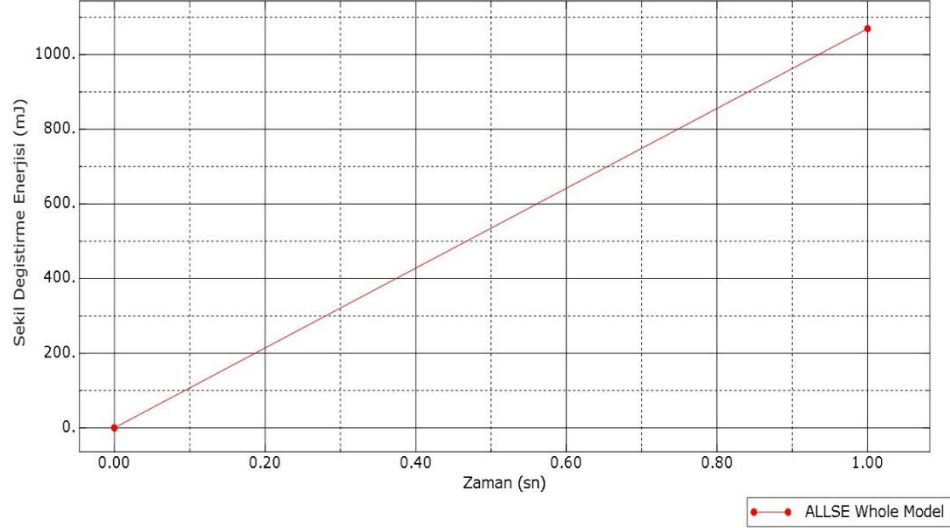


Şekil 3.8. AISI 1040 için dairesel geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.9. AISI 1040 için dairesel geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

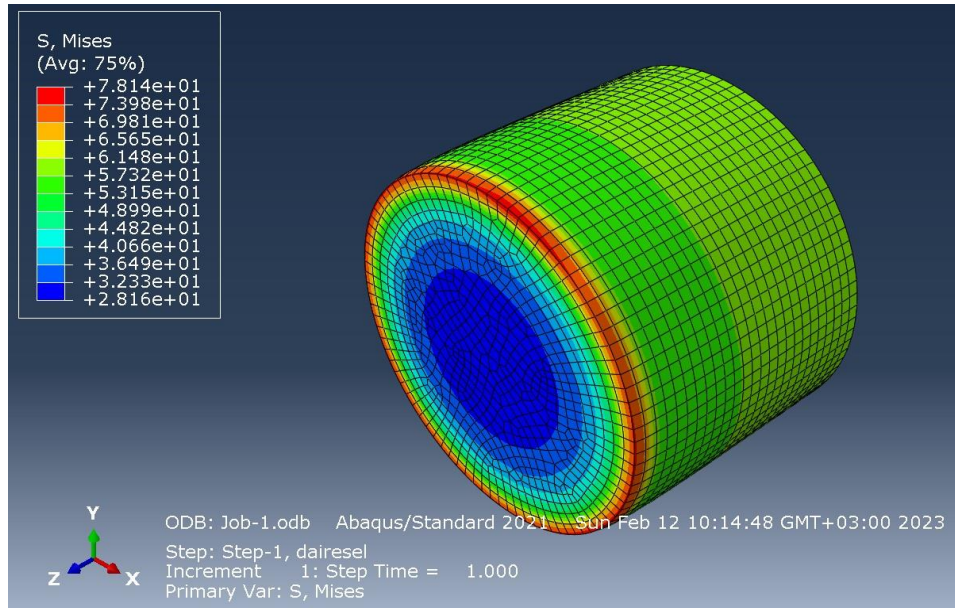
Şekil 3.10 daki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AISI 1040 malzeme de, 61 MPa yük altında 1069,65 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



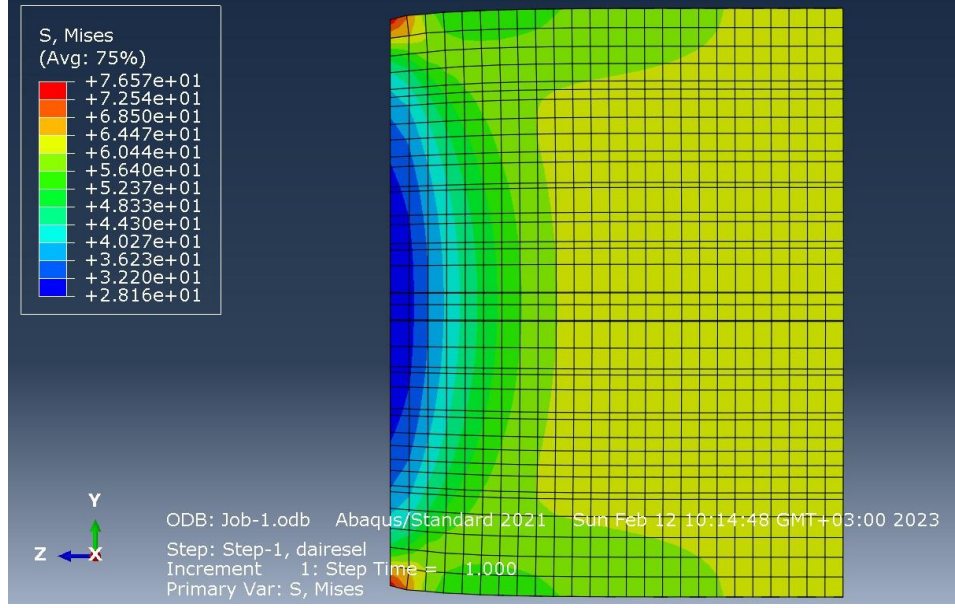
Şekil 3.10. Dairesel geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.1.2 AA7075 Malzeme

Şekil 3.11 de görüldüğü gibi AA7075 malzeme için en yüksek gerilme değeri 78,14 MPa ve en düşük gerilme değeri 28,16 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.12 de belirtildiği gibi 72,54 MPa – 28,16 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

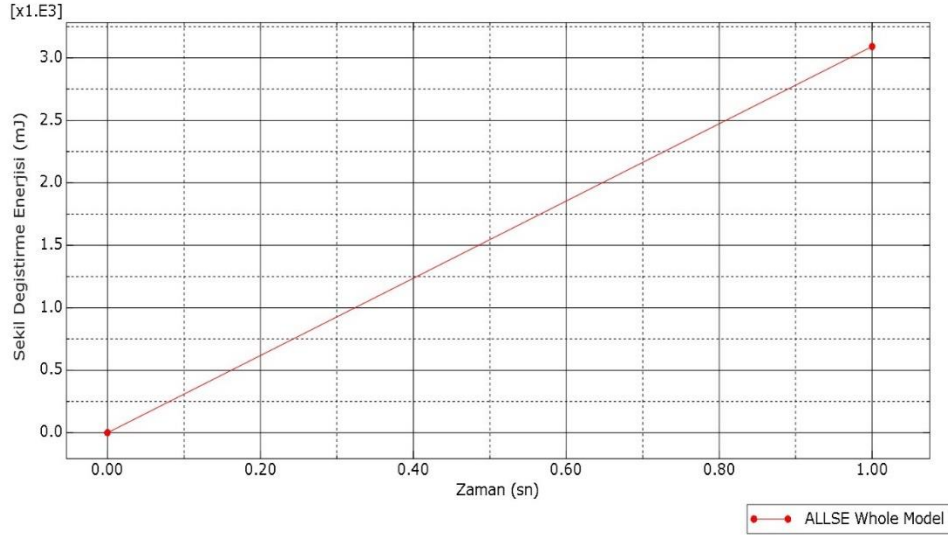


Şekil 3.11. AA7075 için dairesele geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.12. AA7075 için dairesel geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

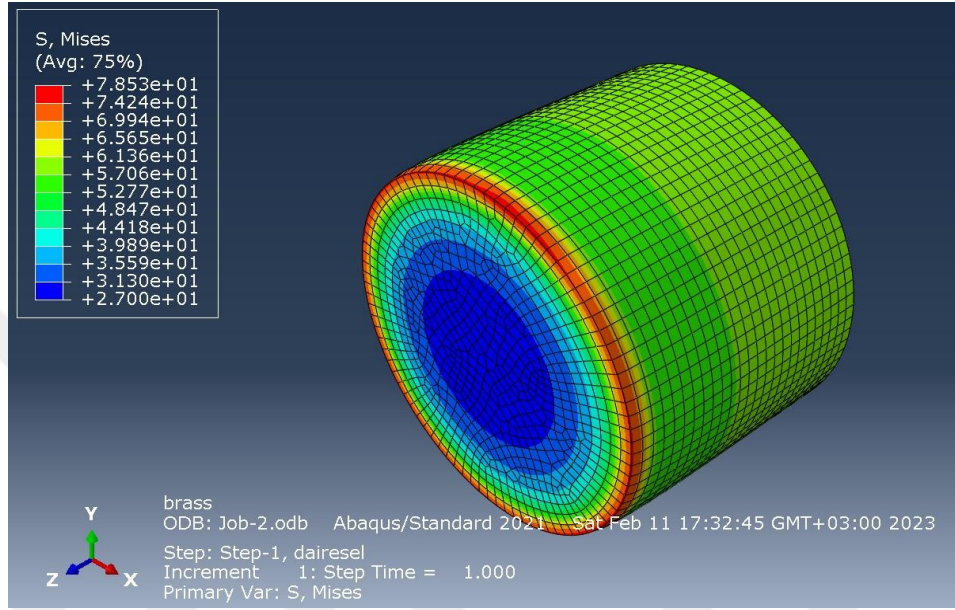
Şekil 3.13 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AA7075 malzeme de, 61 MPa yük altında 3090,99 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



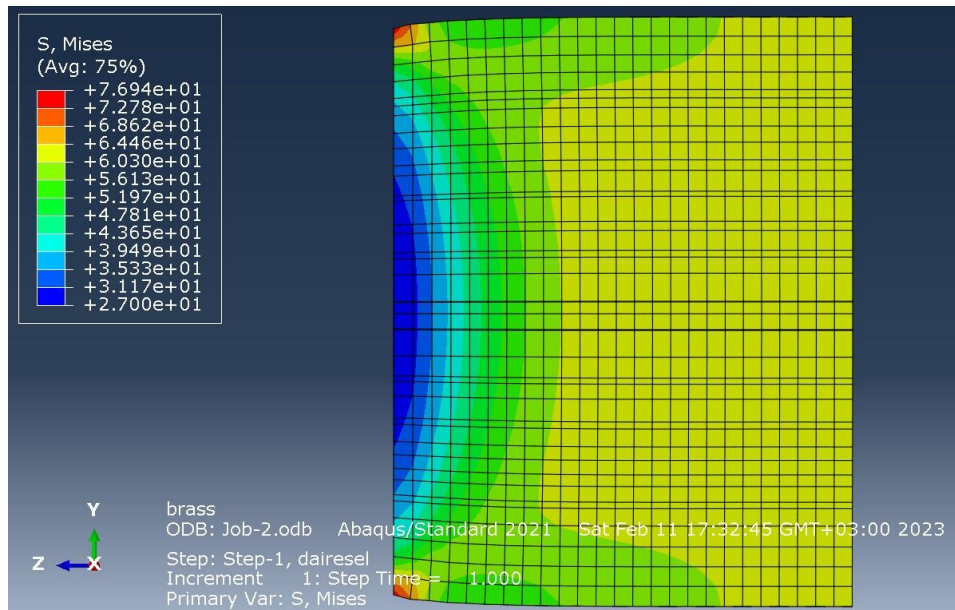
Şekil 3.13. Dairesel geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.1.3 Ms62 Malzeme

Şekil 3.14 de görüldüğü gibi Ms62 malzeme için en yüksek gerilme değeri 78,53 MPa ve en düşük gerilme değeri 27 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.15 de belirtildiği gibi 72,78 MPa – 27 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

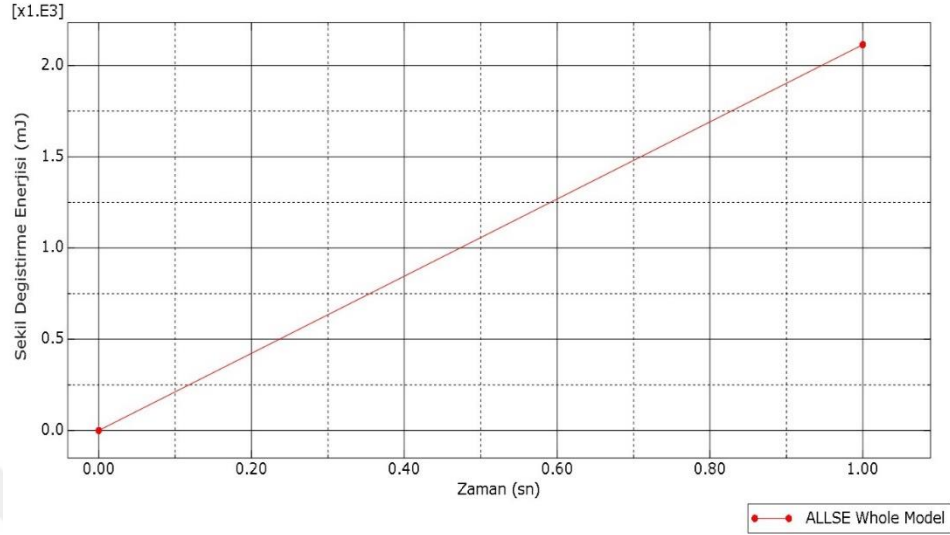


Şekil 3.14. Ms62 için dairesel geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.15. Ms62 için dairesel geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

Şekil 3.16 daki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki Ms62 malzeme de, 61 MPa yük altında 2114,07 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



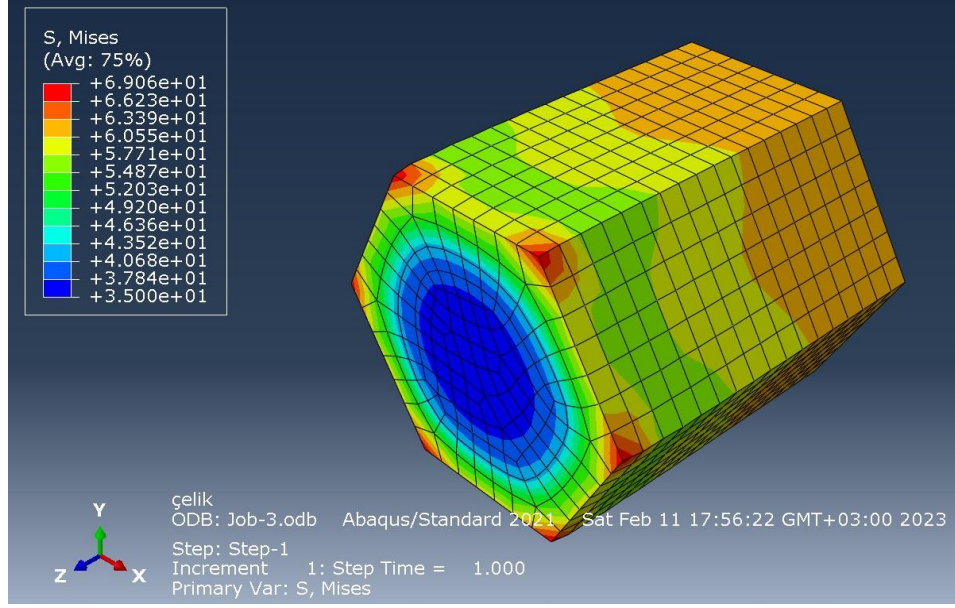
Şekil 3.16. Dairesel geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.2. Altıgen Geometri

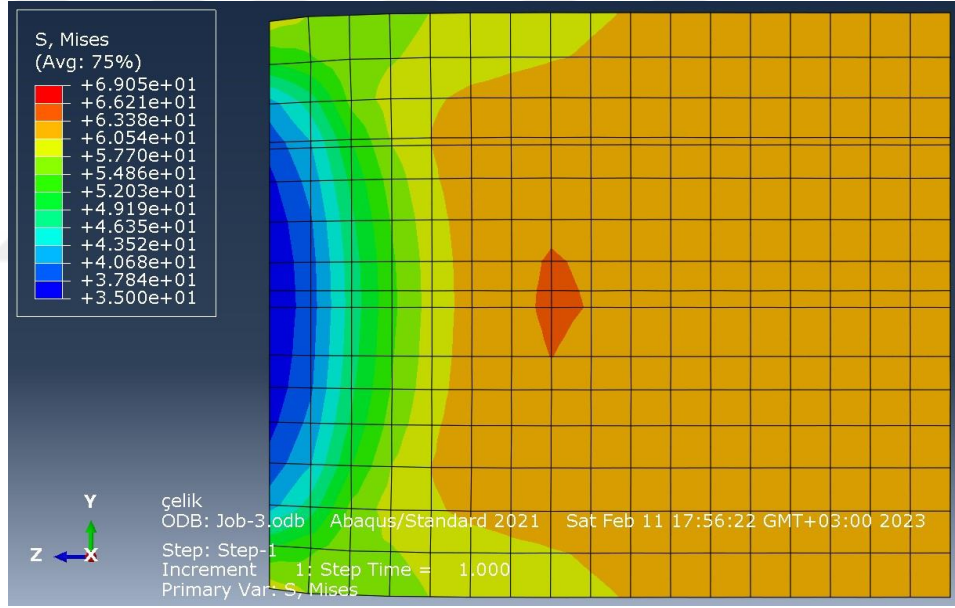
AISI 1040, AA7075 ve Ms62 malzemeleri için altıgen geometrili homojen cisim esas alınarak yapılan sıkıştırma işlemi ve bu işlem neticesinde oluşan gerilme büyüklükleri ve şekil değiştirme enerjileri bu bölümde izah edilmiştir.

3.4.2.1 AISI 1040 Malzeme

Şekil 3.17 de görüldüğü gibi AISI 1040 malzeme için en yüksek gerilme değeri 69,06 MPa ve en düşük gerilme değeri 35 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.18 de belirtildiği gibi 66,21 MPa – 35 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

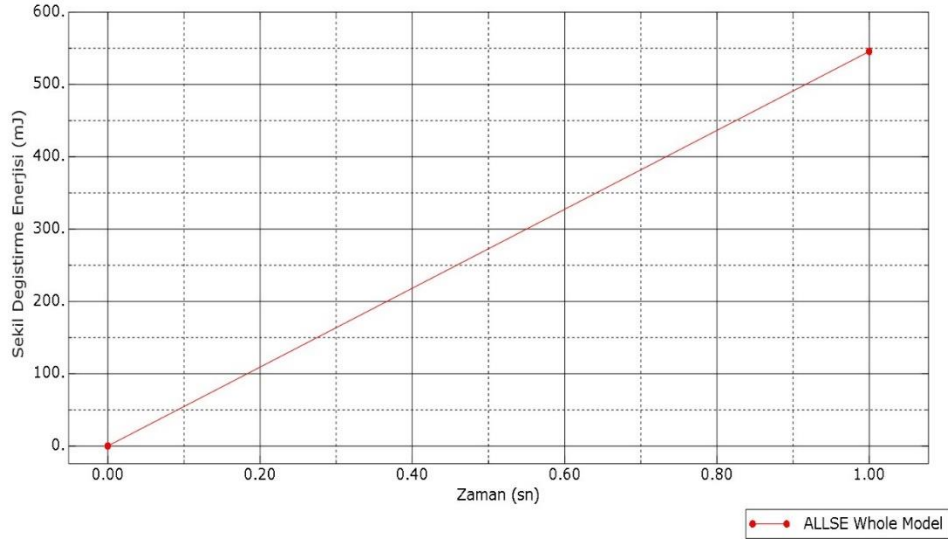


Şekil 3.17. AISI 1040 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.18. AISI 1040 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

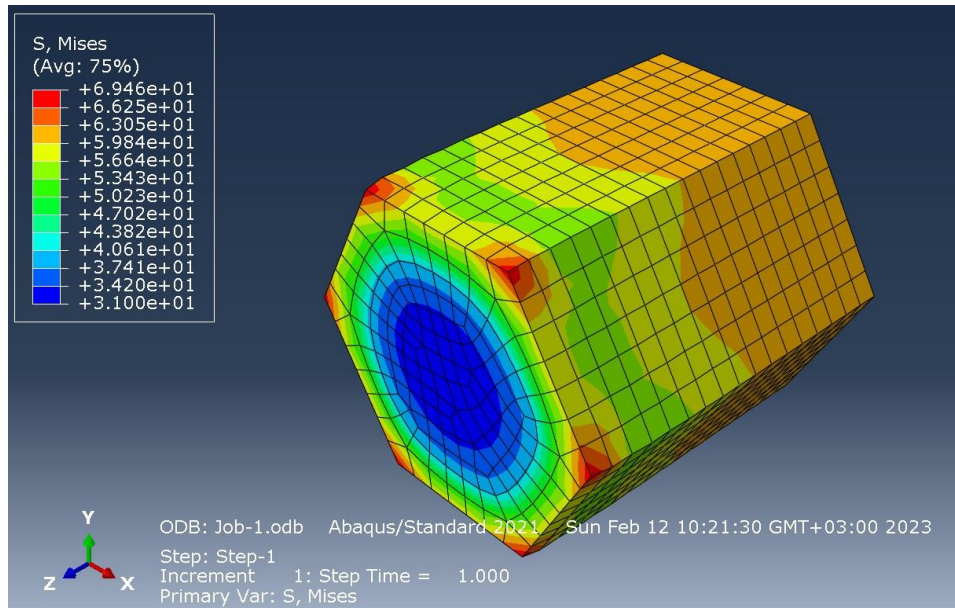
Şekil 3.19 daki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AISI 1040 malzeme de, 61 MPa yük altında 545,58 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



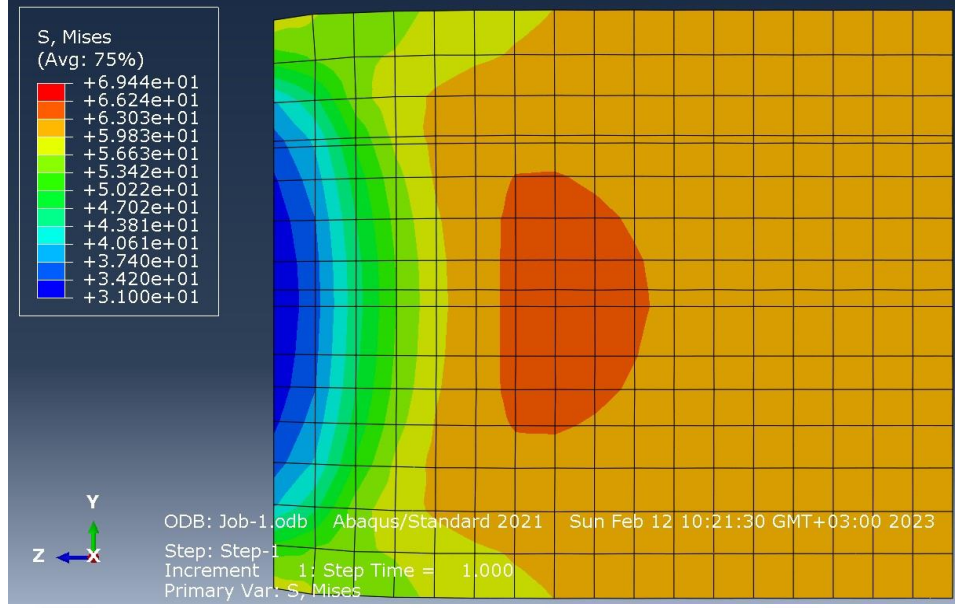
Şekil 3.19. Altıgen geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.2.2 AA7075 Malzeme

Şekil 3.20 de görüldüğü gibi AA7075 malzeme için en yüksek gerilme değeri 69,46 MPa ve en düşük gerilme değeri 31 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.21 de belirtildiği gibi 66,24 MPa – 31 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

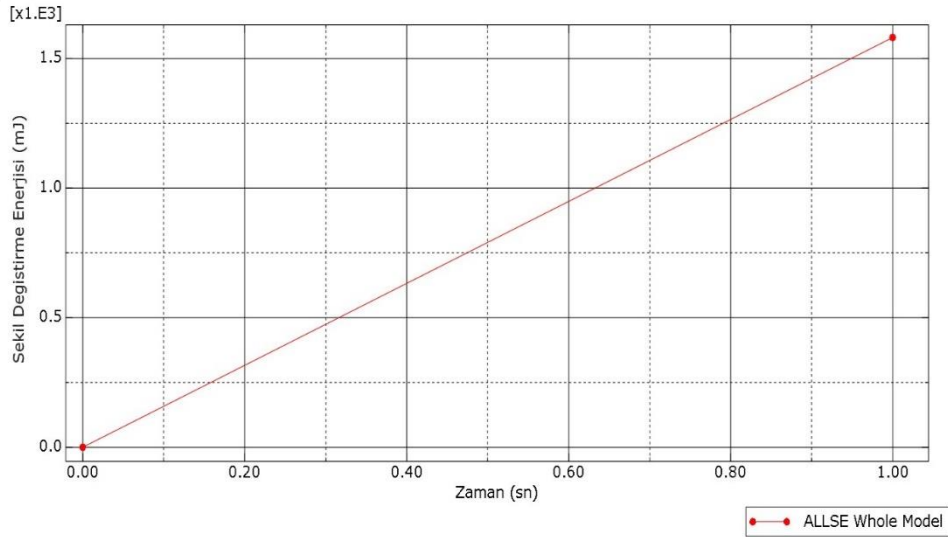


Şekil 3.20. AA7075 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.21. AA7075 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

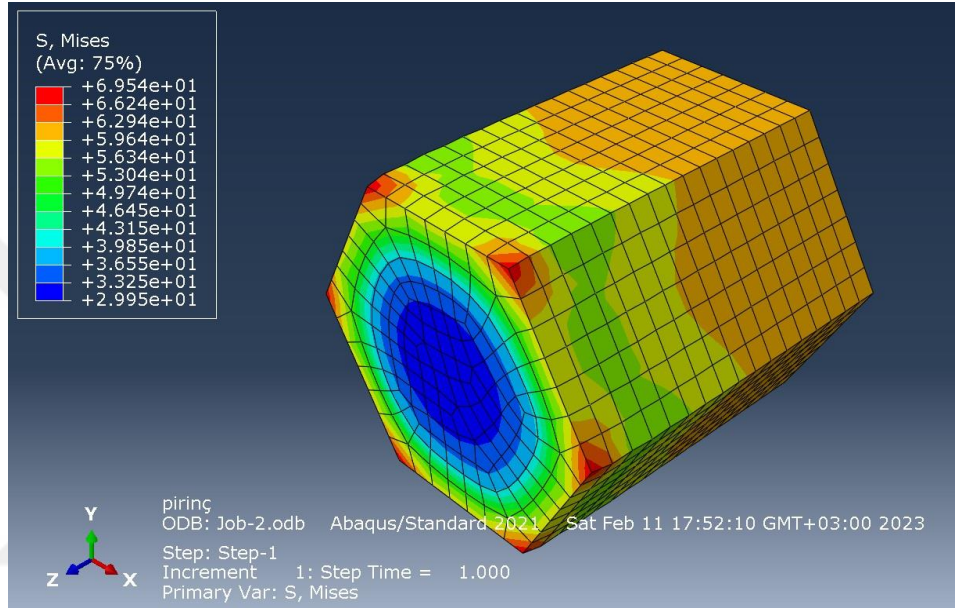
Şekil 3.22 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AA7075 malzeme de, 61 MPa yük altında 1580,84 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



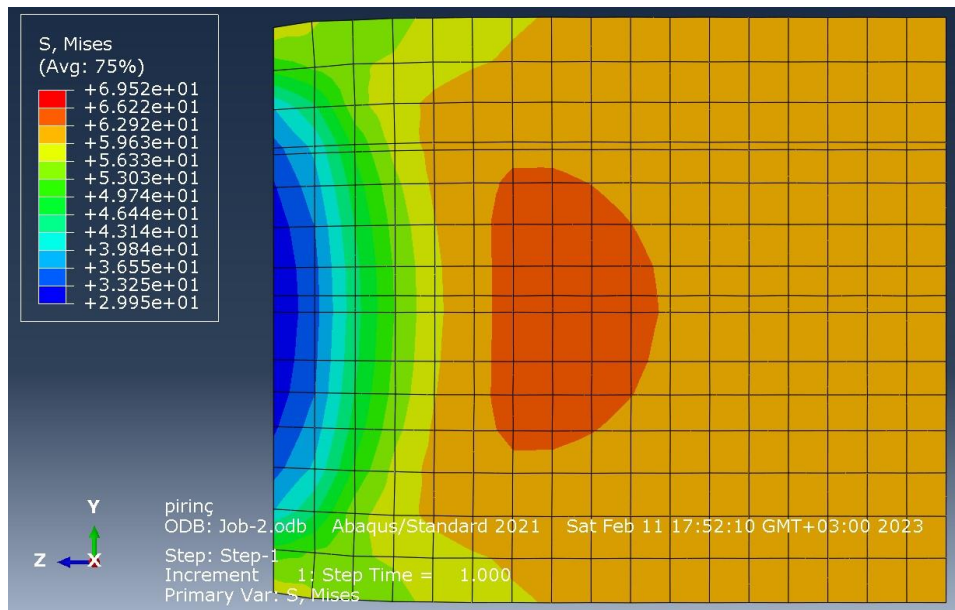
Şekil 3.22. Altıgen geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.2.3 Ms62 Malzeme

Şekil 3.23 de görüldüğü gibi Ms62 malzeme için en yüksek gerilme değeri 69,54 MPa ve en düşük gerilme değeri 29,95 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.24 de belirtildiği gibi 66,22 MPa – 29,95 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

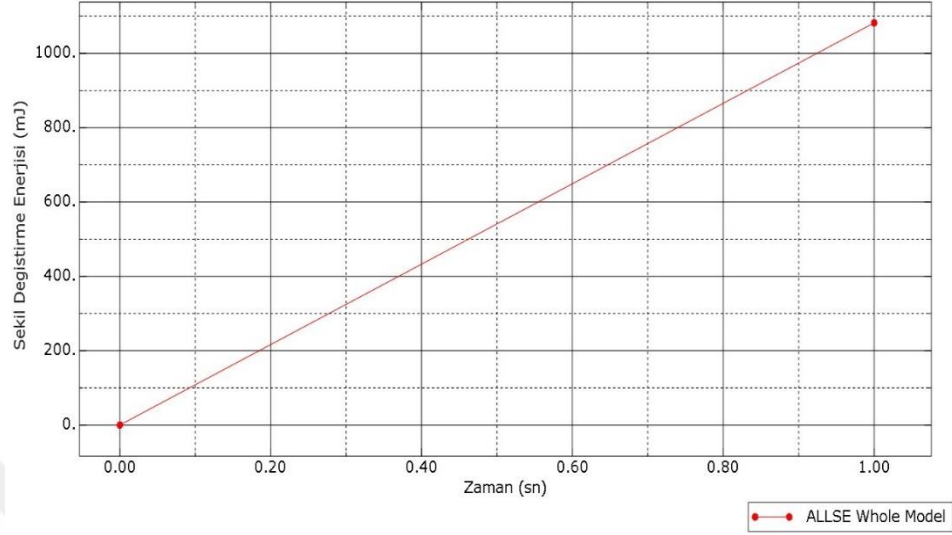


Şekil 3.23. Ms62 için altıgen geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.24. Ms62 için altıgen geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

Şekil 3.25 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki Ms62 malzeme de, 61 MPa yük altında 1082,03 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



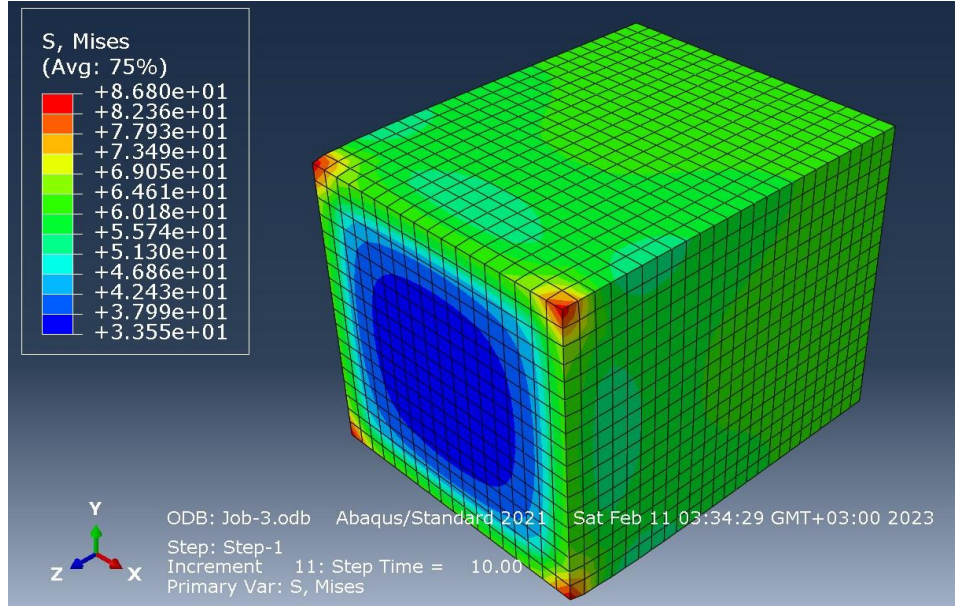
Şekil 3.25. Altıgen geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.3. Kare Geometri

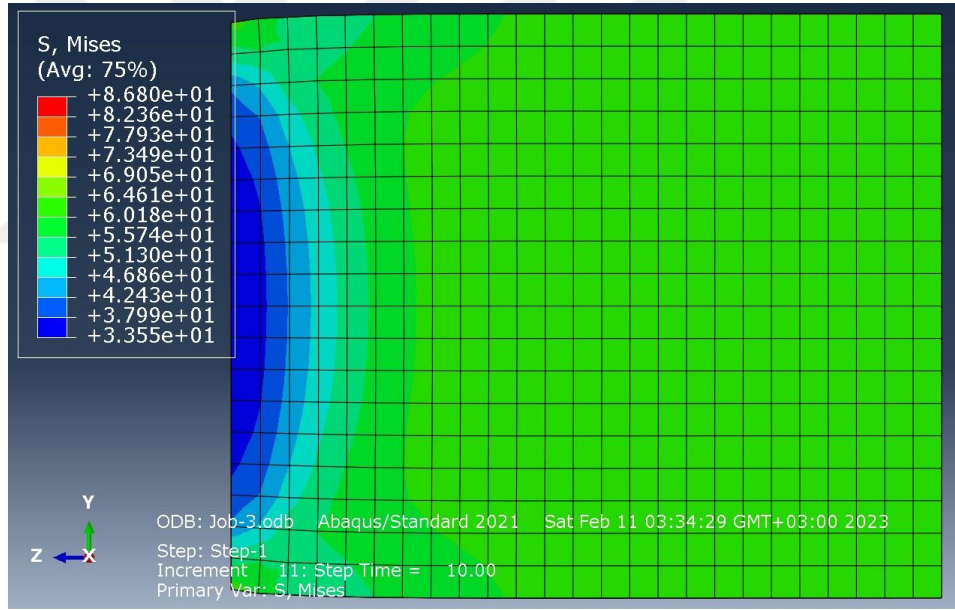
AISI 1040, AA7075 ve Ms62 malzemeleri için kare geometrili homojen cisim esas alınarak yapılan sıkıştırma işlemi ve bu işlem neticesinde oluşan gerilme büyüklükleri ve şekil değiştirme enerjileri bu bölümde izah edilmiştir.

3.4.3.1 AISI 1040 Malzeme

Şekil 3.26 da görüldüğü gibi AISI 1040 malzeme için en yüksek gerilme değeri 86,80 MPa ve en düşük gerilme değeri 33,55 MPa'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.27 de belirtildiği gibi 82,36 MPa – 33,55 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

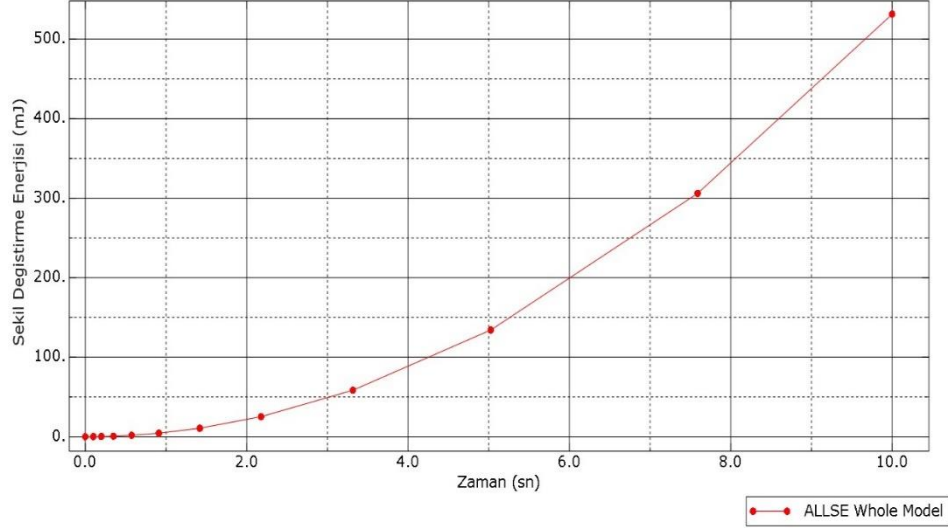


Şekil 3.26. AISI 1040 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.27. AISI 1040 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

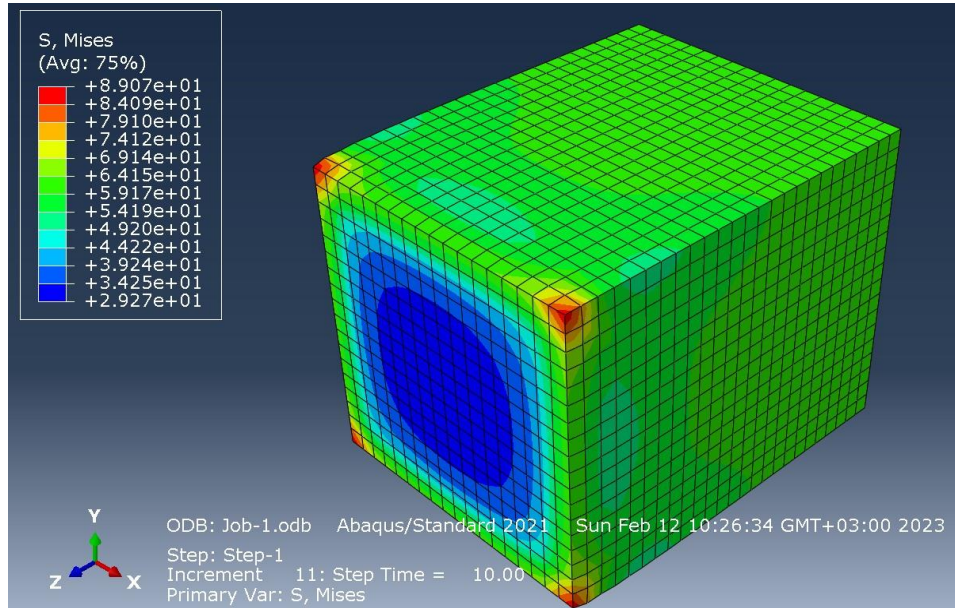
Şekil 3.28 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AISI 1040 malzeme de, 61 MPa yük altında 531,43 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



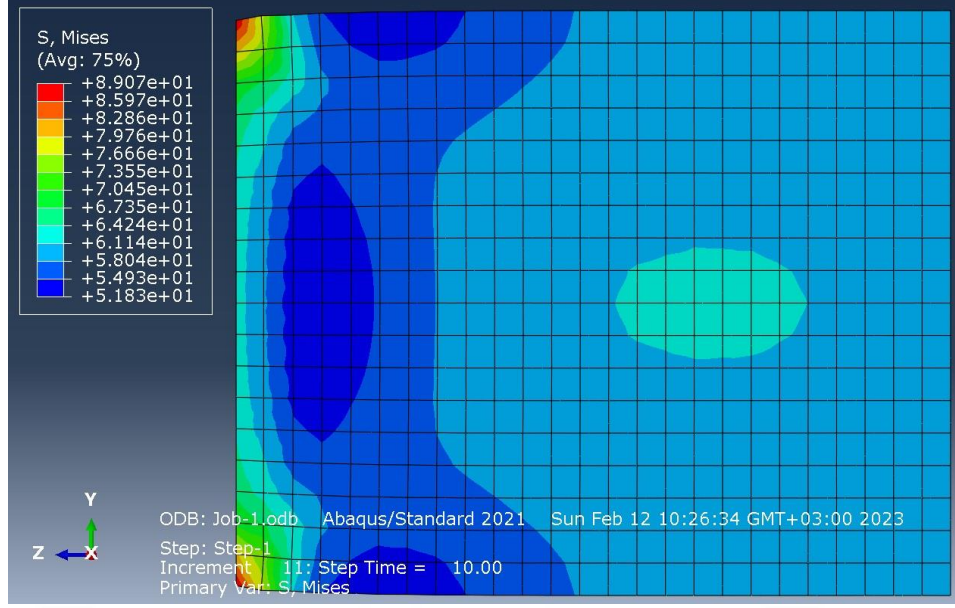
Şekil 3.28. Kare geometride AISI 1040 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

3.4.3.2 AA7075 Malzeme

Şekil 3.29 da görüldüğü gibi AA7075 malzeme için en yüksek gerilme değeri 89,07 MPa ve en düşük gerilme değeri 29,27 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.30 da belirtildiği gibi 85,97 MPa – 29,27 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

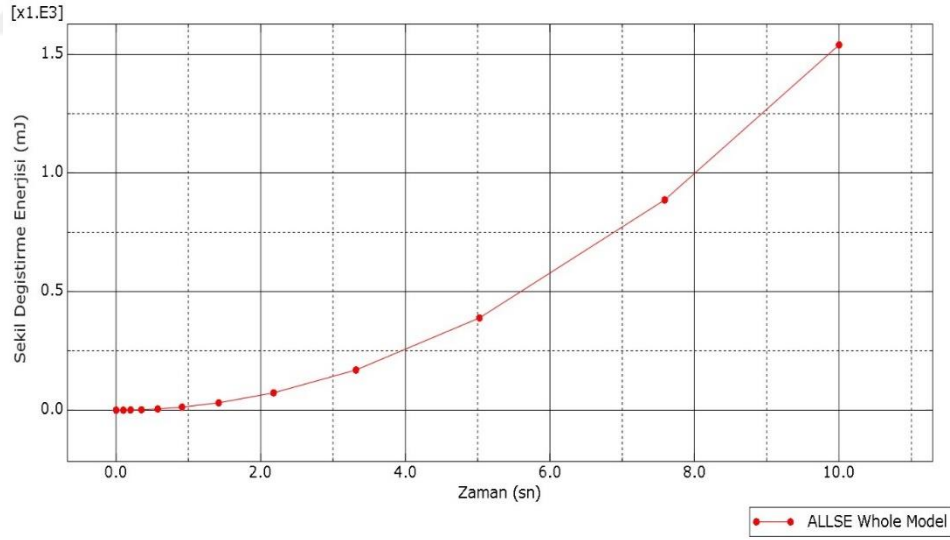


Şekil 3.29. AA7075 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.30. AA7075 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

Şekil 3.31 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki AA7075 malzeme de, 61 MPa yük altında 1539,88 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.

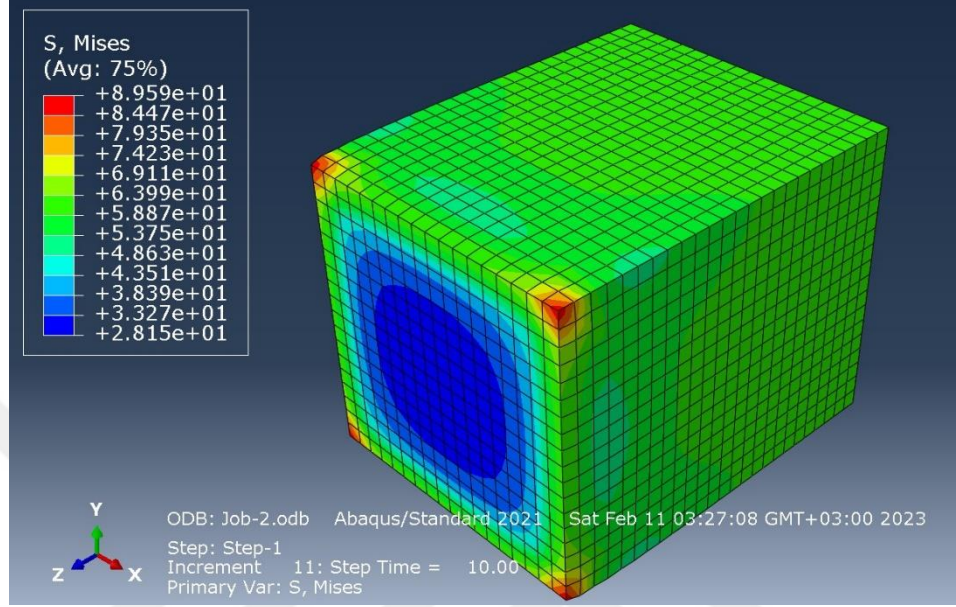


Şekil 3.31. Kare geometride AA7075 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

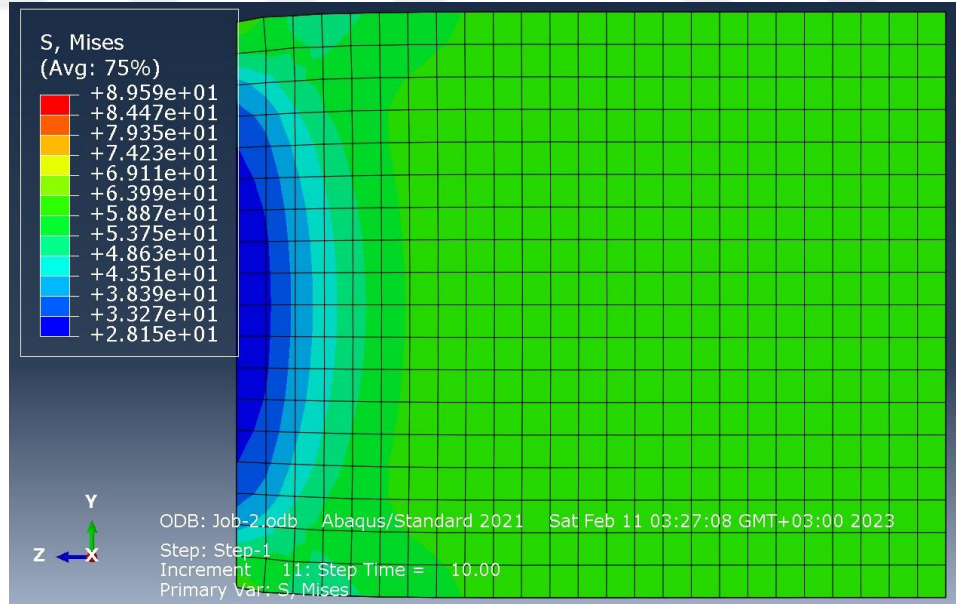
3.4.3.3 Ms62 Malzeme

Şekil 3.32 de görüldüğü gibi Ms62 malzeme için en yüksek gerilme değeri 89,59 MPa ve en düşük gerilme değeri 28,15 MPa 'dır. Gerilmeler basıncın etki ettiği üst

yüzeyin kenarlarında birikmektedir. Yüzey altına inildiğinde Şekil 3.33 de belirtildiği gibi 84,47 MPa – 28,15 MPa aralığında ve etki değeri kenarlardan hacim merkezine doğru artış gösteren bir gerilme dağılımının olduğu görülmektedir.

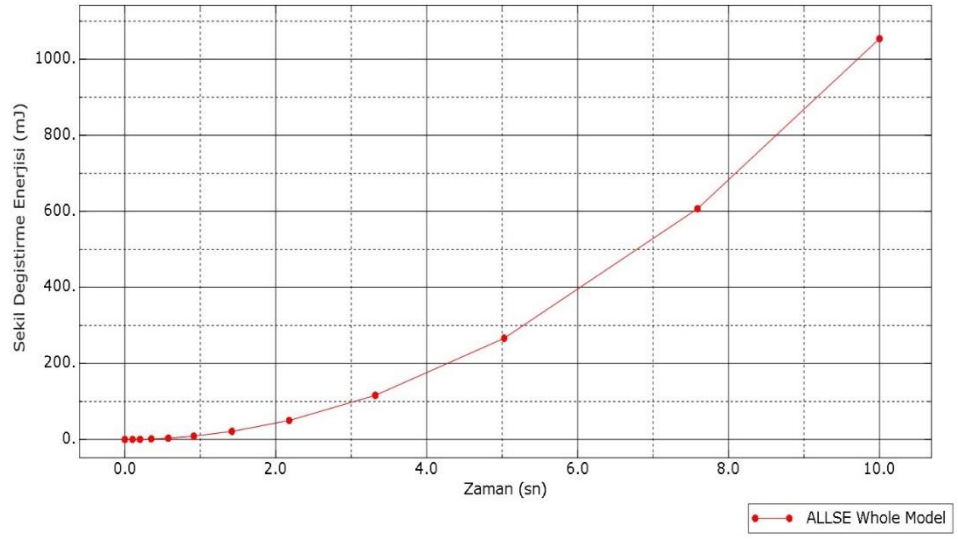


Şekil 3.32. Ms62 için kare geometride gerilme durumu (İzometrik görünüş)



Şekil 3.33. Ms62 için kare geometride gerilme durumu (Kesit görünüş)

Şekil 3.34 deki grafikte de gösterildiği gibi dairesel geometrideki Ms62 malzeme de, 61 MPa yük altında 1054 mJ büyüklüğünde şekil değiştirme enerjisi meydana gelmiştir.



Şekil 3.34. Kare geometride Ms62 için şekil değiştirme enerjisi-zaman grafiği

4. TARTIŞMA

İstatistiksel metot ile yapılan elde edilen bulgulara göre AISI 1040 için anlamlı olan parametre kuvvettir. Kare ve altıgen kalıpta sürtünme kuvvetlerinin yan yüzey alanlarının büyüklüğü sebebiyle harekete zıt yöndeki sürtünme kuvvetinin arttığı, bu kalıplardaki kenar çizgilerinin gerilme yığılmasına neden olduğu ve talaş hareketini engellediği matematiksel ve sonlu elemanlar metodunda belirtilmiştir. Ayrıca istatistiksel yöntem, tahmin değerlerinde her iki malzeme grubu için dairesel kalıbın en iyi sonucu vereceğini öngörse de tüm kalıp geometrileri için p anlamlılık değerinin 0,05 'ten büyük çıkması metodun kendisi ile çeliştiğini göstermektedir. Bu bulgulara rağmen istatistiksel metodun kalıp geometrileri arasında anlamlı bir fark olmadığını göstermesi, metodun talaş gibi anizotropik malzemeler ile yapılacak deneylerde elde edilecek verilerin yorumlanmasını güçleştirdiğini ortaya koymuştur. Deney sayısının arttırılmasının sonucu nasıl etkileyeceği tartışmalı bir durumdur.

İstatistiksel metot ile AISI 1040 için yapılan varyans analizinde kuvvet miktarı faktörünün, Ms62 için yapılan varyans analizinde ise kalıp geometrisi faktörünün anlamlılık değerinin $p < 0,05$ olması ve AA7075 için yapılan analizde ise hiçbir faktörün anlamlı kabul edilmemesi, metodun benzer deney gruplarında birbiri ile çelişen sonuçlar ortaya koyabileceğini göstermektedir.

AISI 1040 ve Ms62 gibi mekanik özellikleri oldukça farklı iki malzeme grubunda en iyi tahmini talaş boyutunun ince talaş, AA7075 için ise kalın talaş bulunması, istatistiksel metodun talaş gibi anizotropik malzemelerde uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır.

Briket makinelerinde genel olarak imalatının ve onarımının kolay olması nedeniyle dairesel geometrili kalıp tercih edilmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen bulgular kalıpta sıkışma eksenı boyunca uniform gerilme dağılımının mevcut olduğunu göstermektedir. Ancak en yüksek yoğunluk değerinin kare kalıpta olması dikkat çeken bir durumdur. Deney sayısının arttırılması sonuç değerlerini değiştirebilir.

AISI 1040 çeliği için hacimsel doluluk oranı için en iyi değer, deney tasarımı aşamasında bulunan % 39'dur. Tahmin edilen deneyde ise bu sonuç ortalama % 38,70'dir. Deneysel ve tahminle elde edilen değerler birbirine oldukça yakındır. Ancak daha yüksek çıkması umulan bir sonuca ulaşamamıştır. Sonraki çalışmalar için

araştırılması gereken bir durumdur.

Matematiksel denklemler incelendiğinde, eşit sıkıştırma kuvvetinin uygulanması halinde en yüksek gerilmenin dairesel kalıpta olduğu Tablo 3.13 de belirtilmişti. Ancak talaşı sıkıştıran yüzeye dik yöndeki P_x net basıncı, uygulama basıncı olan P_0 'a göre büyük oranda azalmaktadır. Sürtünme sebepli olduğu bilinen bu durum araştırılmaya açıktır. Yapılacak araştırmalarda yağlamanın sıkıştırma basıncı üstündeki etkisi tartışmalıdır.

AA7075 malzeme ile yapılan deneysel çalışmalara göre en yüksek yoğunluk sonucuna 3 numaralı deneyde, kare geometrili 15 gr ince talaşa 7500 kgf yük uygulandığında ulaşılmıştır. Dairesel kalıpta basılmış numunelerin yoğunluk değerlerinin yüksek olmasına rağmen en yüksek sonucun kare kalıpta oluşması tartışmalı bir durumdur.

FEM analizinde sıkıştırılacak talaşları modellemek ve sıkışma anında kalıp içerisinde bulunacakları geometrik yerleşim bölgesini önceden tahmin edebilmek mümkün değildir. Bu nedenden dolayı sonlu elemanlar metodu ile yapılan gerilme hesabında izotropik ve dolu numune için gerilme değerleri bulunmuştur. Ancak simülasyonu oluşturan parametreler aynı olmasına rağmen gerilme büyüklük ve dağılımlarının farklı olması kalıp geometrisinin etkili olduğunu göstermektedir. Mesh yoğunluğunun artırılması ve tercih edilen C3D8R yerine farklı bir eleman tercih edilmesi durumu araştırılmalıdır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

İstatistiksel metotlar çözüm sürecini ve maliyetini kısaltmaktadır. Ancak her numunenin bir diğerinden farklı özellikte olduğu anizotropik malzemelerde, sonuç üzerinde mutlak etkisinin olduğu bilinen ve bilimsel literatüre girmiş talaş boyutu veya kuvvet gibi parametrelerin bile anlamlı olmaması durumu bu tip malzemeler için istatistiksel yöntem yerine klasik yöntem ile devam edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Deneyler sonucunda bulunmuş yoğunluk değerleri mukayese edildiğinde, talaş sıkıştırma işleminde tercih edilen geleneksel dairesel kalıp yerine AA7075 talaşı için kare geometrilili kalıbın da kullanılabileceği görülmüştür. AISI 1040 tipi sert malzemelerin sıkıştırılmasında altıgen kalıpları tercih etmek mümkündür. Ms62 türü yumuşak malzemelerde geleneksel dairesel kalıp geometrisinin kullanılması daha verimli sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca kuvvet miktarının artması sıkışma kabiliyeti üzerinde olumlu etki yapmaktadır. Tüm kalıplarda en yüksek yoğunluk değeri en büyük kuvvet uygulandığında bulunmuştur.

Yoğunluk büyüklükleri incelendiğinde en yüksek değerlerin daha çok ince talaş kullanıldığında meydana geldiği görülmüştür. Talaşların birbirine olan yönelimi sırasında küçük talaşın diğerlerine göre daha serbest hareket ettiği anlaşılmaktadır. Geri dönüşüm firmalarının bu durumu dikkate alarak sıkıştırma öncesi büyük ve orta ebatlı talaşların kırma işlemini yapması faydalı olacaktır.

Hacimsel doluluk durumu verilerine göre AISI 1040 talaşı için yapılan deneylerde en yüksek doluluğun % 39 ile altıgen kalıpta, AA7075 için % 19,43 ile kare kalıpta ve Ms62 için % 41,90 ile dairesel kalıpta olduğu bulunmuştur.

Denklem oluşturularak elde edilen net basınç değerleri karşılaştırıldığında, dairesel kalıbın kare kalıba göre % 5, altıgen kalıba göre %11 daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Talaşa etki net basıncın dairesel kalıpta daha yüksek olduğu görülmektedir. Zımba ilerleme miktarına bağlı P_x değerinin zıt yöndeki sürtünme kuvvetinin etkisine karşın en büyük olduğu kalıp dairesel geometrilili olmalıdır. Üretim ve bakım maliyetlerinin düşük olmasının yanında yüksek basınç değerlerine ulaşılabilir olması bu geometrideki kalıpların kullanım süreçlerinin devamı yönünde pozitif bir kanaat oluşturmaktadır.

Tüm kalıp geometrileri için sonlu elemanlar metodu ile şekil değiştirme enerjisi analizi yapıldığında, kalıpların tamamında alüminyum malzemenin şekil değiştirme enerjisinin diğer malzeme gruplarına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Aynı şekilde sıkışma yoğunluğunun da yüksek değerlerde olması şekil değiştirme enerjisinden elde edilen verilerin anlamlılığını desteklemektedir.

Sonlu eleman metoduna göre brikette meydana gelen gerilme dağılımının homojen ve büyük olduğu durum kare kalıpta bulunmuştur. Ayrıca Abaqus yazılımından elde edilen şekil değiştirme enerjisi verilerine göre en yüksek şekil değiştirme enerjisinin 3090,99 mJ büyüklüğünde ve dairesel kalıpta olduğu görülmüştür. Enerjinin malzeme içerisinde homojen dağıldığı ve en büyük değerine ulaştığı dairesel kalıpların geri dönüşüm tesislerindeki bilimsel yönü olmayan ekonomik temelli kullanımı, yoğunluk kalitesindeki ölçülmüş verilerin ışığı altında ile bilimsel açıdan da desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ab Kadir, M. I., Mustapa, M. S., Latif, N. A., & Mahdi, A. S. (2017). Microstructural analysis and mechanical properties of direct recycling aluminium chips AA6061/Al powder fabricated by uniaxial cold compaction technique. *Procedia Engineering*, 184, 687-694.
- Ab Rahim, S., Lajis, M., & Ariffin, S. (2015). A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*, 26, 761-766.
- Abbas, N., Deng, X., Li, X., & Reynolds, A. P. (2017). Compaction of machining chips: Experiments and modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 134, 436-444.
- Adinamis, G., Gorsler, F., & Estelle, A. (2019). High speed machining of brass rod alloys. *Rem*, 30403, 304L.
- Agrawal, R., & Mukhopadhyay, A. (2022). Optimization of wear performance and COF of AISI 1040 steel using grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*.
- AzoMaterials. (2012). *AISI 1040 carbon steel (UNS G10400)*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6525>
- AzoMaterials. (2005). *Aluminium: Specifications, Properties, Classifications and Classes*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>
- AzoMaterials. *Copper Alloys - Brasses*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=63>, (08.02.2023).
- Baffari, D., Buffa, G., Ingarao, G., Masnata, A., & Fratini, L. (2019). Aluminium sheet metal scrap recycling through friction consolidation. *Procedia Manufacturing*, 29, 560-566.
- Canakci, A., & Varol, T. (2014). Microstructure and properties of AA7075/Al-SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing. *Powder Technology*, 268, 72-79.
- Cooper, D. R., Song, J., & Gerard, R. (2018). Metal recovery during melting of extruded machining chips. *Journal of cleaner production*, 200, 282-292.
- Curi, K., & Kocasoy, G. (1982). Wastes recovery with sorting technologies in the city of Istanbul. *Recycling in Developing Countries*, E. Freitag, Berlin.
- Ecucut. (2014). Ecocut-Tech Ecp serisi briketleme presi. Retrieved 08.05.2022 from <https://www.ecocut-tech.com/briketleme-presi/#2>.
- Ecucut. (2014). Ecp Briketleme Presi. Retrieved 08.05.2022 from https://www.ecocut-tech.com/_pdf/ECOCUT-TECH-ECP-Serisi-Biriketleme-Presi-Brosur.pdf
- Empo. (2016). *EN AW 7075*. Empo Alüminyum San. Tic. Ltd. Şti. . <http://www.empo.com.tr/aluminyum-lama-ve-cubuk/en-aw-7075.html>
- Esenduran, G., Kemahlioğlu-Ziya, E., & Swaminathan, J. M. (2012). Product take-back legislation and its impact on recycling and remanufacturing industries. In *Sustainable supply chains* (pp. 129-148). Springer.
- Evreka. *Entegre Atık Yönetimi Neden Gerekli?* <https://evreka.co/wp-content/uploads/2022/06/atik-yonetimi-hiyerarisi.png>, (07.02.2023).
- Fatihpres. (2022). *2 Sıkmalı Sac Metal Hurda Presi*. Retrieved 06.05.2022 from <https://www.fatihpres.com.tr/hurda-presi-sac-metal-presi.htm>
- Fraley, S., Zalemski, J., Oom, M., & Terrien, B. (2022). Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays. In *Chemical Process Dynamics and Controls (Woolf)* (pp. 14.1.01-14.1.10). Libretext Engineering.

- Fullenwider, B., Kiani, P., Schoenung, J. M., & Ma, K. (2019). Two-stage ball milling of recycled machining chips to create an alternative feedstock powder for metal additive manufacturing. *Powder Technology*, 342, 562-571.
- Gico. (2021). Material Datasheet CuZn40 (CW509L). In: Ghoshouni Industrial Co. .
- Gökçe, B., & Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
- Grayson, J. (2017). Reducing melt loss and dross generation. *Light Metal Age*, 75, 32-35.
- Gustafsson, G., Häggblad, H.-Å., & Jonsén, P. (2013). Multi-particle finite element modelling of the compression of iron ore pellets with statistically distributed geometric and material data. *Powder Technology*, 239, 231-238.
- Gülüzade, R. (2011). *Alüminyum ve Çelik Testere Talaşlarından Sinterleme İle Üretilen Metal Matriks Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları* Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ...].
- Güner, F., Cora, Ö. N., & Sofuoğlu, H. (2015). Numerical modeling of cold powder compaction using multi particle and continuum media approaches. *Powder Technology*, 271, 238-247.
- Harun, Y., Levent, U., & Akkuş, H. (2016). AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün çoklu regresyon ile incelenmesi. *Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 770-775.
- Hassan, M. F., Afham, M. F., Arifin, A. M. T., Ibrahim, M. R., Rahim, M. Z., & Ahmad, M. F. (2017). Design and development of a portable metal chip baler using a system design approach. *MATEC Web of Conferences*,
- Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., & Miller, W. (2000). Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 102-107.
- Hekimoğlu, (2022). Resim Galerisi. Retrieved 08.05.2022 from <https://www.ankara-hurda.com/galeri-1.html>
- Jerier, J.-F., Hathong, B., Richefeu, V., Chareyre, B., Imbault, D., Donze, F.-V., & Doremus, P. (2011). Study of cold powder compaction by using the discrete element method. *Powder Technology*, 208(2), 537-541.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufacturing process for engineering materials* (5th ed.). Pearson Education Inc.
- Kang, C. S., Lee, S., Kim, K., & Rozenberg, O. (2007). Densification behavior of iron powder during cold stepped compaction. *Materials Science and Engineering: A*, 452, 359-366.
- Karşlıoğlu, Z. (2013). *Fire Analizinde Deney Tasarımı* [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi].
- Kavak, N., & Şencan, A. Ç. (2014). *Waste management of metal chips in machining* 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Bursa, Türkiye.
- Kim, E., & Changani, H. (2015). Study of dynamic mechanical behavior of aluminum 7075-T6 with respect to diameters and L/D ratios using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 55(4), 857-869.
- Koçoğlu, S., & Yıldızlı, K. (2022). *AISI 1040 Çelik Talaşlarının Sıkışma Kabiliyetlerinin Farklı Kalıp Geometrilerinde Deneysel İncelenmesi* 1 st International Conference On Scientific And Academic Research, Konya/Türkiye.

- Koçoğlu, S., & Yıldızlı, K. (2022). AA7075 Alüminyum Talaşının Kalıp Geometrisindeki Değişime Bağlı Sıkışma Kabiliyetinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi 1 st International Conference On Scientific And Academic Research, Konya/Türkiye.
- Meral, G., Sarıkaya, M., & Dilipak, H. (2011). Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(4), 332-338.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- Narvan, M., Behnagh, R. A., Shen, N., Givi, M. K. B., & Ding, H. (2016). Shear compaction processing of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites directly from magnesium chips. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 39-48.
- Öktem, B. (2016). Atık yönetiminde entegre uygulama. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 6(2/1), 135-147.
- Özden, E. (2020). *Elektrostatik toz boya proses parametrelerinin deney tasarımı yöntemleri ile optimizasyonu ve endüstriyel uygulaması* Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Peng, T., Wang, Q., & Lin, J. (2009). Microstructure and mechanical properties of Mg–10Gd–2Y–0.5 Zr alloy recycled by cyclic extrusion compression. *Materials Science and Engineering: A*, 516(1-2), 23-30.
- Rawal, N., & Gangrade, K. Optimization of Cutting Parameter for Non-ferrous Materials through Taguchi Technique for CNC Turning. *Journal homepage: www. ijrpr. com* ISSN, 2582, 7421.
- Rendigs, K. (1997). Aluminium structures used in aerospace-status and prospects. Materials Science Forum,
- Savaşkan, M., Taptık, Y., & Ürgen, M. (2010). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Dergisi /d*, 3(6).
- Sgm. (2014). *Ulusal geri dönüşüm strateji belgesi ve eylem planı 2014-2017*. Türkiye Cumhuriyeti Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/12/20141230M1-12-1.pdf>
- Shahrom, M. S., & Yusoff, A. R. (2017). Cyclic extrusion compression back pressure technique for hot forging process in direct recycling of aluminium 6061 machining chip. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 1-9.
- Shamsudin, S., Lajis, M., & Zhong, Z. (2016a). Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: a review. *Procedia CIRP*, 40, 256-261.
- Shamsudin, S., Lajis, M., & Zhong, Z. (2016b). Solid-state recycling of light metals: A review. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(8), 1687814016661921. <https://doi.org/10.1177/1687814016661921>
- Simon, L., Moraes, C. A., Modolo, R. C., Vargas, M., Calheiro, D., & Brehm, F. A. (2017). Recycling of contaminated metallic chip based on eco-efficiency and eco-effectiveness approaches. *Journal of cleaner production*, 153, 417-424.
- Skanska. (2012). 4R Guide: Reduce, Reuse, Recycle, Recover. In. Stockholm: Skanska Group.
- Şanyılmaz, M. (2006). Deney tasarımı ve kalite geliştirme faaliyetlerinde Taguchi yöntemi ile bir uygulama. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Kütahya*.
- Şeremet, M., & Kam, M. (2019). *An evaluation on the effect of parameters on surface roughness and tool wear in the turning process of AISI 4140 steel* Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar) Bildiriler Kitabı Cilt II (Fen Bilimleri), Kocaeli/Türkiye.

- Tang, W., & Reynolds, A. P. (2010). Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips. *Journal of materials processing technology*, 210(15), 2231-2237.
- Tekkaya, A., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., & Pantke, K. (2009). Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. *Journal of materials processing technology*, 209(7), 3343-3350.
- Topolski, K., Bochniak, W., Łagoda, M., Ostachowski, P., & Garbacz, H. (2017). Structure and properties of titanium produced by a new method of chip recycling. *Journal of materials processing technology*, 248, 80-91.
- Toufatzis, A. I., Pantazopoulos, G. A., David, C. N., Sagris, D. S., & Paipetis, A. S. (2018). Machinability of eco-friendly lead-free brass alloys: Cutting-force and surface-roughness optimization. *Metals*, 8(4), 250.
- Uzun, R. O., & Arslan, D. (2021). Retrogresyon ve yeniden yaşlandırma işlemi uygulanmış 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik davranışı. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 34-41.
- Verma, P., Saha, R., & Chaira, D. (2018). Waste steel scrap to nanostructured powder and superior compact through powder metallurgy: Powder generation, processing and characterization. *Powder Technology*, 326, 159-167.
- Wan, B., Chen, W., Lu, T., Liu, F., Jiang, Z., & Mao, M. (2017). Review of solid state recycling of aluminum chips. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 37-47.
- Wang, Y., Xu, H., Hu, M., Sugiyama, S., & Ji, Z. (2019). Enhanced mechanical properties of a chip-based Al-Si-Cu-Fe alloy with an in-situ emulsion decomposition recycled by solid-state processing. *Results in Physics*, 12, 718-724.
- Williams, J. C., & Starke Jr, E. A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta materialia*, 51(19), 5775-5799.
- Zhang, H., Li, X., Deng, X., Reynolds, A., & Sutton, M. (2018). Numerical simulation of friction extrusion process. *Journal of materials processing technology*, 253, 17-26.
- Zhang, H., Zhao, X., Deng, X., Sutton, M. A., Reynolds, A. P., McNeill, S. R., & Ke, X. (2014). Investigation of material flow during friction extrusion process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 85, 130-141.

ÖZ GEÇMİŞ

Suat Koçoğlu, Samsun Özel Ar Fen Lisesi'ni bitirdikten sonra Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünden 16.07.2003 tarihinde mezun oldu. 2012 yılında OMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. 2016 tarihinde bitirdi, 2017 yılında OMÜ LEE Makine Mühendisliği ABD doktora programına başladı. Mezuniyetinden itibaren Makine Mühendisi olarak görev yapan Suat Koçoğlu'nun temel ilgi alanları, makine konstrüksiyonu ve imalatıdır.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-4906-8570

Yayınlar:

1. Koçoğlu, S., & Yıldızlı, K. (2022). *AISI 1040 Çelik Talaşlarının Sıkışma Kabiliyetlerinin Farklı Kalıp Geometrilerinde Deneysel İncelenmesi* 1 st International Conference On Scientific And Academic Research, Konya/Türkiye.
2. Koçoğlu, S., & Yıldızlı, K. (2022). *AA7075 Alüminyum Talaşının Kalıp Geometrisindeki Değişime Bağlı Sıkışma Kabiliyetinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi* 1 st International Conference On Scientific And Academic Research, Konya/Türkiye.
3. Koçoğlu, S., & Yıldızlı, K. (2022). Farklı Kalıp Geometrilerinde AA7075 Talaşlarının Sıkıştırılma Kabiliyetlerinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Cilt 14, Sayı 3, 244 – 254.*