T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA BİLYELİ DÖVME İŞLEMİNİN MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Gül KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet DEMİRER

Temmuz 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA BİLYELİ DÖVME İŞLEMİNİN MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Gül KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 30/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Osman İYİBİLGİN	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Ahmet DEMİRER	BAŞARILI
Üye: Öğr. Üyesi Ömer SEÇGİN	BAŞARILI

BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Alüminyum Alaşımlarında Bilyeli Dövme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ahmet DEMİRER'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Ayşe Gül KOCAMAN

30/07/2021

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım Doç. Dr. Ahmet DEMİRER'e yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgisini ve tecrübelerini benimle paylaşarak desteğini esirgemediği için teşekkür ederim.

Sigma Shot Peening firmasının müdürü Şükrü İĞDECİ'ye bilyalı dövme prosesinin uygulanmasında sağlamış olduğu destek için teşekkür ederim. Laboratuar desteği konusunda yardımlarının esirgemeyen Sakarya Üniverversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Araştırma Görevlisi Abdulkadir KIZILARSLAN'a teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte herzaman yanımda olan Giray KOCA'ya ve beni yetiştiren ve eğitimimin her aşamasında yanımda olan aileme, sağladıkları maddi ve manevi destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **iv**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **v**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **vi**
ÖZET ..... **viii**
SUMMARY ..... **ix**

BÖLÜM 1. GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2. BİLYELİ DÖVME İŞLEMİ **3**
2.1. Bilye özellikleri 6
2.2. Almen şiddeti 8
2.3. Yüzey örtme oranı 10

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **12**
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler 12
3.1.1. AA 6061 T6 alüminyum alaşımı 12
3.1.2. AA 5754 H111 alüminyum alaşımı 13
3.1.3. S235 JR (St37) 13
3.2. Bilyeli Dövme İşlemi Parametreleri 14
3.3. Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması 19

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA **23**
4.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi 23

4.1.1. Çekme deneyi sonuçları 23
4.1.2. Darbe deneyi sonuçları.....28
4.1.3. Mikrosertlik sonuçları 31
4.2. Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi.....35

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 43
5.1. Genel Sonuçlar.....43
5.2. Öneriler 46

KAYNAKLAR.....47

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
bar	: Basınç
C	: Karbon
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
EN	: Avrupa Standardı
Fe	: Demir
g	: Gram
He	: Helyum
HV	: Vickers Sertlik Yöntemi
Hz	: Frekans
ISO	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu
Mg	: Magnezyum
min	: Dakika
mm	: Milimetre
mm^2	: Milimetrekare
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
O_2	: Oksijen
SAE	: Society Of Automobile Engineers
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
TS	: Türk Standartları
VSD	: Vickers Sertlik Değeri

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Bilye tipleri [18]. 6
Tablo 2.2: Almen şeritlerinin özellikleri [21]. 9
Tablo 3.1: AA6061 T6 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri. 12
Tablo 3.2: AA6061 T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri. 13
Tablo 3.3: AA5754 H111 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri. 13
Tablo 3.4: AA5754 H111 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri..... 13
Tablo 3.5: S 235 JR Çeliğinin kimyasal özellikleri. 14
Tablo 3.6: S 235 JR Çeliğinin mekanik özellikleri. 14
Tablo 3.7: Deneylerde kullanılan bilye özellikleri..... 17
Tablo 3.8: Bilyeli dövme işlem parametreleri..... 18
Tablo 4.1: Çekme testi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100)..... 27
Tablo 4.2: Sabit basınçta yüzey örtme oranı göre çekme testi sonuçları. 28
Tablo 4.3: Numunelerin S330'a ait yüzey sertlikleri ve sertlik artış oranı. 34
Tablo 4.4: Numunelerin S330'a ait yüzey pürüzlülük ve artış oranı. 37
Tablo 5.1: Bilyeli dövme işlemi genel sonuçları. 43

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Bilyeli dövme işleminde bilyenin yüksek hızda çarpma etkisi 3
Şekil 2.2: İniş takımları dişlisi 4
Şekil 2.3: Bilyeli dövme sonrası malzeme üzerinde meydana gelen değişimler. ... 5
Şekil 2.4: SAE standardındaki bilyeler 7
Şekil 2.5: Dökme demirde bilye çapının yüzey kalitesi üzerine etkisi. 8
Şekil 2.6: Almen şeritleri ve Almen tutucu. 9
Şekil 2.7: Almen ölçüm cihazı. 9
Şekil 2.8: Dövme süresi-eğrilik yüksekliği grafiğinden yüzey örtme oranı tayini. 10
Şekil 2.9: Bilyeli dövme ile tam kaplanan yüzey ve eksik kaplanan yüzey görüntüleri 11
Şekil 3. 1: Bilyeli dövme işlemi ve makine teknik özellikleri. 15
Şekil 3. 2: Bilyeli dövme işlemi (a) Şematik gösterimi (b) Vakumlu bilyeli dövme makinesi. 16
Şekil 3. 3: Levhaların bilyeli dövme işleminden sonra üzerinden test numuneleri alınması. 19
Şekil 3. 4: Çekme numunesi boyutları (ISO 6892-1). 20
Şekil 3. 5:Darbe deneyi test cihazı ve test numunesi. 20
Şekil 3. 6: Yüzey pürüzlülük ölçümü. 21
Şekil 3. 7: Sertlik ölçümleri için bakalite alınan numunelere ait görsel. 21
Şekil 3. 8: Mikrosertlik deneyi test cihazı. 22
Şekil 3. 9: Taramalı elektron mikroskobu (SEM). 22
Şekil 4.1: Bilyeli dövme ile AA 6061 T6 numunelerinin çekme deneyi sonuçları. 24
Şekil 4.2: Bilyeli dövme ile AA 5754 H111 numunelerinin çekme deneyi sonuçları. 24
Şekil 4.3: Bilyeli dövme ile S235 JR numunelerinin çekme deneyi sonuçları. 25
Şekil 4.4: Farklı örtücülük oranlarında ve 6 barda Çekme testi sonuçları. 26
Şekil 4.5: AA6061 T6 darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100). 29
Şekil 4.6: AA5754 H111 darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100). 29
Şekil 4.7: S235 JR darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100). 30
Şekil 4.8: Darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı: %100 ve %200). 30
Şekil 4.9: Mikro sertlik ölçümünün şematik gösterimi. 31
Şekil 4.10: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar). 31
Şekil 4.11: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar). 32

Şekil 4.12: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (8 bar). 32
Şekil 4.13: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar). 32
Şekil 4.14: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar). 33
Şekil 4.15: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar). 33
Şekil 4.16: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar). 33
Şekil 4.17: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar). 34
Şekil 4.18: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (8 bar). 34
Şekil 4.19: AA6061 T6 numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü. 35
Şekil 4.20: AA5754 H111 numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü 36
Şekil 4.21: S235 JR numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü. 36
Şekil 4.22: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm). 37
Şekil 4.23: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.60 mm). 38
Şekil 4.24: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm). 38
Şekil 4.25: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm). 39
Şekil 4.26: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.6 mm). 39
Şekil 4.27: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm). 40
Şekil 4.28: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm). 40
Şekil 4.29: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.60 mm). 41
Şekil 4.30: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm). 41

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA BİLYELİ DÖVME İŞLEMİNİN MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bilyeli dövme işlemi malzemenin mekanik ve yüzey özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanan bir prosestir. Dövme işlemi ile birlikte malzeme yüzeyi plastik deformasyona uğrar. Otomotiv ve savunma sanayisi gibi birçok alanda S235JR (St37) çeliği kullanılmaktadır. Hız ve manevra kabiliyetlerinin ön plana çıktığı araçlarda mevcut ağırlığın azaltılması önemli bir hususu oluşturmaktadır. Bu çalışmada S235JR çeliğine alternatif olabilecek AA6061 T6 ve AA5754 H111 alüminyum alaşımlarına çift taraflı bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır.

Bu çalışmada, 3 farklı türde ve 3 mm kalınlıktaki malzemelere, 3 farklı püskürtme basıncında (4 bar, 6 bar, 8 bar), %100 yüzey örtme oranında S170 (0.4 mm), S230 (0.6 mm) ve S330 (0.84 mm) çelik bilyeler ile dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyeli dövmenin önemli parametrelerinden olan yüzey örtme oranı 6 bar püskürtme basıncında, %100'den %200'e çıkarılarak deney tekrarlanmıştır. Belirlenen parametreler doğrultusunda 36 farklı deney yapılmış ve her deney için çekme deneyi ve darbe deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra bilyeli dövme ile işlenen numunelere taramalı elektron mikroskobu, mikrosertlik deneyi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü ile yüzey özellikleri ortaya konmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda malzemelerin mekanik ve yüzey özellikleri incelenmiştir. AA6061 T6 ve AA5754 H111 alüminyum alaşımlarında ve S235JR çeliğinde bilyeli dövme ile (%100 yüzey örtme oranında) çekme dayanımında sırasıyla; %3.8, %7.67 ve %8.98 artış meydana gelmiştir. Örtücülük oranı arttıkça çekme dayanımı da artış göstermiştir. Bütün malzemelerde çift taraflı bilyeli dövme işlemi sonunda dış yüzeyden merkeze doğru sertliklerde tedrici olarak düşme gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde püskürtme basıncı ve örtücülük oranı arttıkça darbe dayanımında düşme tespit edilmiştir. Püskürtme basıncının artışı her iki bilye çapında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış göstermiştir. Yüzey özelliklerinin değerlendirmesinde SEM analizi kullanılmıştır. SEM görüntüleri bilyeli dövmenin malzeme yüzeyindeki plastik deformasyonu incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilyeli Dövme, Bilye boyutu, Püskürtme basıncı, AA6061 T6 , AA5754 H111, S235JR.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHOT PEENING ON THE MECHANICAL AND SURFACE PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS

SUMMARY

Shot peening is a process applied to improve the mechanical and surface properties of the material. With the forging process, the material surface undergoes plastic deformation. S235JR steel is used in many fields such as automotive and defense industry. Reducing the available weight has been an important consideration in vehicles where speed and maneuverability have come to the fore.In this study, ball forging was applied to aluminum alloys AA6061 T6 and AA5754 H111, which may be an alternative to S235JR steel. In this study, 3 different types and 3 mm thickness materials were forged with s170 (0.4 mm), s230 (0.6 mm) and S330 (0.84 mm) steel balls at 3 different spray pressures (4 bar, 6 bar, 8 bar), 100% surface covering ratio. The experiment was repeated by increasing the surface covering ratio, which is one of the important parameters of ball forging, from 100% to 200% at 6 bar spray pressure. In line with the determined parameters, 36 different tests were carried out and tensile and impact tests were applied for each test. The surface properties were then revealed by scanning electron microscopy, microsertness experiment and surface roughness measurement to the samples processed by ball forging.

As a result of the experiments, the mechanical and surface properties of the materials were examined. AA6061 T6 and AA5754 H111 aluminum alloys and s235jr steel with ball forging (100% surface covering rate) increased tensile strength by 3.8%, 7.67% and 8.98%, respectively. As the covering rate increased, the tensile strength also increased. At the end of the double-sided ball forging process in all materials, a gradual decrease in hardness from the outer surface to the center was observed. A decrease in impact resistance was found in all samples as the spray pressure and covering rate increased. The increase in spray pressure increased the surface roughness values of both ball diameters. SEM analysis was

used to evaluate surface properties. SEM images examined the plastic deformation of the ball tattoo on the surface of the material.

Keywords: AA6061 T6, Shot Peening, Shot ball, Peening pressure, AA6061 T6 , AA5754 H111, S235J

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bilyeli dövme, metalik malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerini geliştirmek için kullanılan soğuk şekil verme yöntemidir. Malzemenin yorulma ömrünü arttırmak için uygulanır [1]. Yüksek hızlarda fırlatılan küçük çaplı bilyelerin malzeme yüzeyine tekrarlı çarpması sonucu plastik deformasyon tabakası oluşturur [2]. Bu durum malzemenin tane yapılarını incelterek, çekme dayanımında artış, yüzeyde artık gerilme oluşumu, yüzey ve yüzey altı bölgelerinde sertlik artışı olarak gözlemlenir. Bilyeli dövme prosesinde bilyeler vasıtasıyla malzemeye kinetik enerji aktarımı sağlanmaktadır. Bu enerjinin ölçülmesi için Almen testi geliştirilmiştir. Almen şiddeti; bilye çapı, bilye cinsi, püskürtme basıncı, dövme süresi ve yüzey örtme oranına bağlı olarak değişir [3]. Almen şiddeti arttıkça plastik deformasyon kalınlığı da artmaktadır [4]. Bilyeli dövme otomotiv ve havacılık sektörlerinde sıklıkla kullanılan ucuz ve erişilebilir bir yöntemdir.

Alüminyum malzemeler yüksek korozyon direnci, yüksek özgül dayanım, kolay izlenebilirlik, hafiflik özellikleriyle çelikten sonra en yaygın kullanılan mühendislik malzemeleridir. Alüminyum çelik ile kıyaslandığında üç kat daha hafiftir enerji tasarrufunun önem kazandığı savunma sanayinde, trenler, uçaklar, gemiler ve otomobiller gibi pek çok alanda tercih edilmektedir [5]. Son yıllardaki gelişmeler ile birlikte askeri araçlarda hız ve manevra kabiliyetinin arttırılması önemli bir konu olmuştur. Çelik malzemelerin yerini alacak alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi bu çalışmanın başlıca amaçlarındandır. 6xxx serisi alüminyum alaşımları magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) içerir. Kaynak edilebilme kabiliyetleri yüksektir. Bu özellik üretim masraflarını düşürür [6].

Bu tez çalışmasının amacı, askeri araçların mühimmat rafları olarak kullanılan S235JR (St37) çeliğinin yerine geçmesi planlanan alüminyum alaşımlarına bilyeli dövme işlemi uygulanarak malzemenin mekanik ve yüzey özelliklerinin incelenmesidir. Alüminyum malzemelerin hafiflik, yüksek korozyon direnci ve

kolay işlenebilirlik özelliklerinden yararlanılarak ucuz ve tekrarlanabilir bir yöntem olan bilyeli dövme ile maksimum performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Tez çalışmasının 2. Bölümünde, bilyeli dövme işlemi ayrıntılarıyla yer verilmiştir. Bilyeli dövme işleminin parametreleri incelenmiş, dövme işleminde kullanılan bilyelerin özellikleri verilmiştir. Ayrıca literatürde bilyeli dövme işlemi ile yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

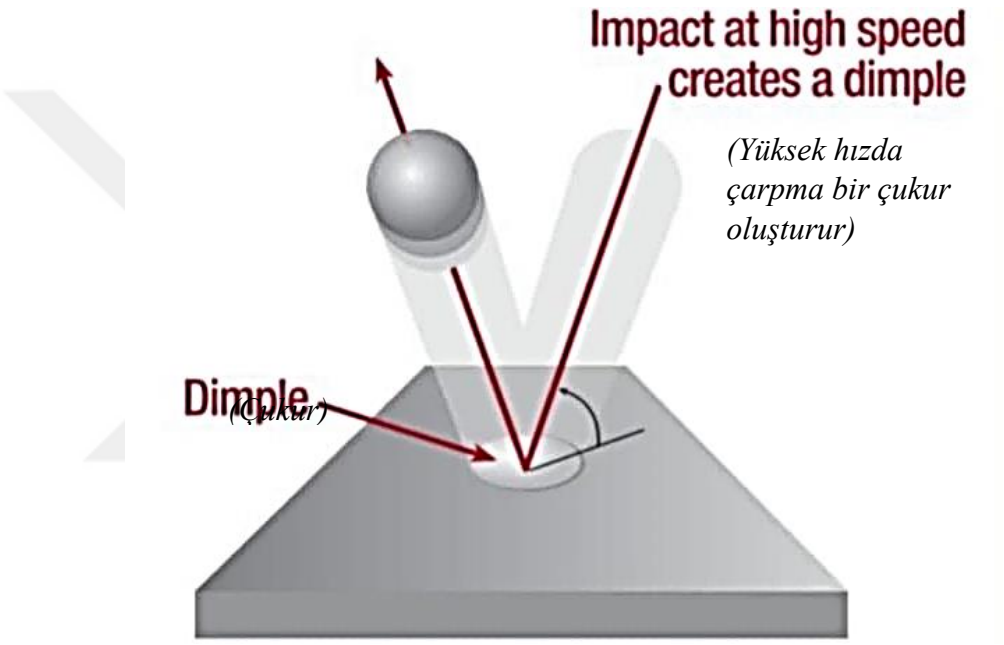
Tez çalışmasının 3. Bölümünde deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Deneyler yapılırken kullanılan malzemelerden ve bilyeli dövme parametrelerinden bahsedilmiştir. Bilyeli dövme işleminden sonra hangi test yöntemlerinin kullanılacağı bu bölümün devamında yer almaktadır.

Tez çalışmasının 4. Bölümünde yapılan deney sonuçları grafik ve tablolarla sunulmuştur. Literatürde mevcut olan çalışmalar ile benzer ve farklı yönleri değerlendirilerek tartışılmıştır.

Tez çalışmasının 5. Bölümü genel sonuçlar ve öneriler kısmından oluşmaktadır. Bu kısımda tüm sonuçlar kısa ve öz bir şekilde maddeler halinde değerlendirilmiş ve bu çalışmanın devamında araştırma yapacaklar için bir takım tavsiyelerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. BİLYELİ DÖVME İŞLEMİ

Bilyeli dövme, küçük bilyelerle bir malzemenin yüzeyine kontrollü bir şekilde tekrarlı atışlarla oluşan soğuk şekillendirme yöntemidir. Dövülen malzemenin yüzeyinde her bilye çekiç gibi çukur oluşturur [7].



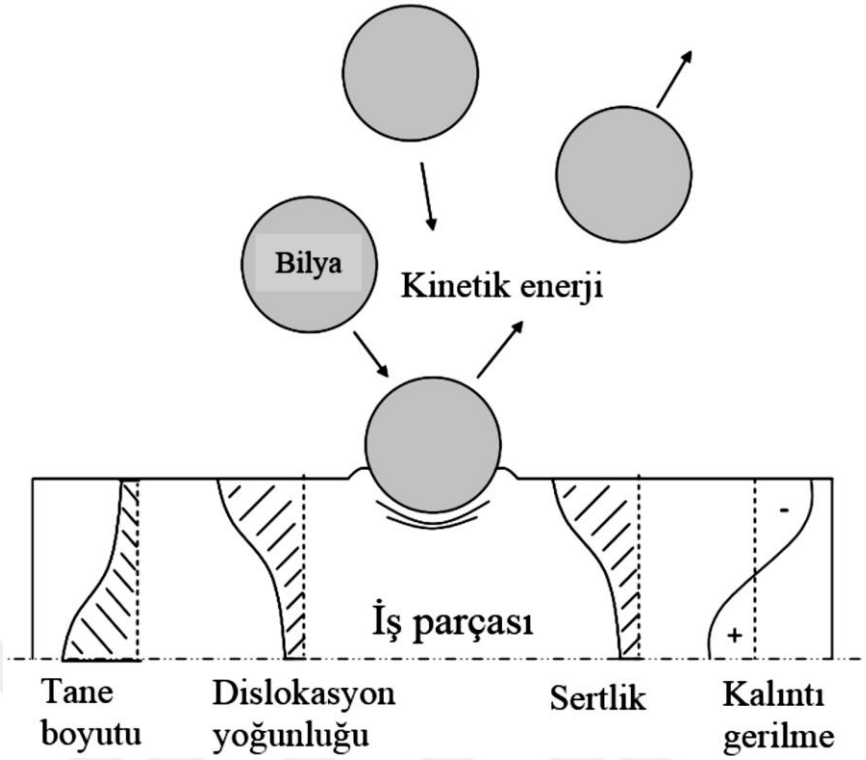
Şekil 2.1: Bilyeli dövme işleminde bilyenin yüksek hızda çarpma etkisi [7].

Bilyeli dövme, yüzey sertliğini arttırmak, yüzey ve yüzey altı tane boyutunda küçülme sağlamak, çatlak oluşumunu önlemek, kalıntı basma gerilmesi oluşturmak, mikro yapı özelliklerini geliştirmek, yorulma dayanımını arttırmak, parça içerisideki gözenekleri gidermek amacıyla otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır [1,8-9]. Havacılık sektöründe, motor ve gövde blokları, iniş takımları, pervanelerde ve kanatlarda bilyeli dövme işlemi uygulanır. Şekil 2.2'de iniş takımına ait bir bilyeli dövme gösterilmiştir. Otomotiv sektöründe ise; kam milleri, krank milleri, silindir blokları, dişliler ve yük altında çalışan yaylarda sıklıkla kullanılır [10].



Şekil 2.2: İniş takımları dişlisi [11].

Bilyeli dövme ile malzemede kalıntı basma gerilmeleri meydana gelir. Bilyeli dövmenin etkilediği yüzey ve yüzeyin hemen altındaki bölge artık basma gerilmesine maruz kalır. Yüzeyden uzaklaştıkça elastik deformasyona uğrayan bölgede ise çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Bu etki malzemenin yorulma dayanımını arttırmaktadır [8]. Bilyeli dövme işlemi sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme gerçekleşir [12]. Bilyeli dövme ekonomik ve güvenilir bir işlemdir. Bilyelerin yüzeye tekrarlı çarpması sonucu yüzey ve yüzey altında meydana gelen değişimler malzeme sertliğini arttırır. Şekil 2.3'te bilyeli dövme işlemi sonrasında dövülen malzeme üzerinde meydana gelen değişimler verilmiştir.



Şekil 2.3: Bilyeli dövme sonrası malzeme üzerinde meydana gelen değişimler [8].

Bilyeli dövme işleminde farklı parametreler, dövülen malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu parametreler; bilye çapı, bilye türü, püskürtme basıncı, püskürtme açısı, yüzey örtme oranı, dövme süresi, püskürtme açısı, nozul çapı ve mesafesidir. Bilyeli dövme işleminde fırlatılan bilyelerin aktardığı kinetik enerjiyi ölçmek için Almen şiddeti kullanılır.

Alüminyum alaşımlar ile yapılan bilyeli dövme işlemleri incelendiğinde Chen ve arkadaşları farklı basınçlarda dövülen AA6061 T6 malzemesini incelemiştir. Basınç arttıkça yüzey pürüzlülüğü, plastik deformasyon kalınlığı ve korozyon direncinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir [13]. Alkan [12], AA1040 ve AA2024 alüminyum alaşımları üzerine yaptığı doktora tezi çalışmasında S230 ve S460 bilyeler ile dövme işlemi gerçekleştirmiş ve akma sınırında artış elde ederken malzemelerin kopma uzamasında azalma olduğunu kaydetmiştir. Sathyajith; lazer ile dövme işlemini AA6061 T6 alüminyum alaşımına uygulamış ve yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon bilye atış yoğunluğu ile birlikte arttığını ve malzemede mikrosertliğin 1.2mm artış gösterdiğini tespit etmiştir [14]. Markovina ve arkadaşları [15], bilyeli dövme parametrelerinden nozul açısı ve nozul mesafesinin AA2024-T3 üzerine etkisini incelemişlerdir.

Bilyeli dövme parametrelerinin hatalı seçilmesi durumunda malzeme yüzeyinde aşırı soyulmaya neden olacağını belirtmişlerdir. Patil ve arkadaşları yaptıkları derlemede bilyeli dövmenin alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalara değinmişlerdir. Bilyeli dövmenin; çekme dayanımı, yorulma ömrü ve korozyon direnci ile doğrudan ilgili olduğunu belirtmişlerdir [16]. Hatamleh ve arkadaşları sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilen numunelere lazer dövme ve bilyeli dövme işlemleri uygulamışlardır. Numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Lazerli dövme yönteminde, bilyeli dövme yöntemine göre mekanin özelliklerdeki artış daha belirgin olmuştur. Lazerli dövmedeki mekanik özelliklerdeki artış gerinme sertleşmesi ile açıklanmıştır [17]. Günümüzde farklı alüminyum alaşımlarında ve farklı dövme türlerinde çok sayıda çalışma halen devam etmektedir.

Bilyeli dövme parametreleri yapılan işlemlere ve parçaya göre değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin hatalı seçilmesi durumunda malzeme yüzeyinde aşırı soyulmaya neden olur. Bilyeli dövme parametreleri bilye özellikleri ve operasyon parametreleri olarak sınıflandıralabilir. Bilye özelliklerinde bilye türü boyutu, sertliği gibi özellikler etkili olurken operasyon parametreleri, Almen şiddeti, yüzey örtme oranı, püskürtme basıncı ve dövme süresi etkilidir [3].

2.1. Bilye özellikleri

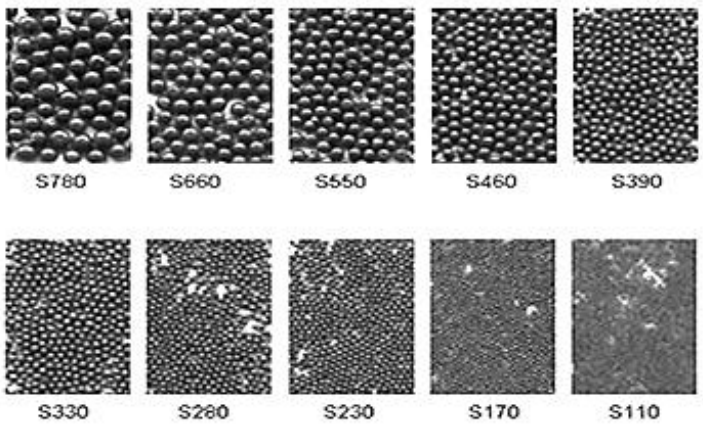
Bilyeli dövmenin en etkili parametresi bilyelerdir. Dövülecek malzeme yüzeyine uygun bilye türü ve bilye boyutu seçilmesi çok önemlidir. Bilyelerde çelik, paslanmaz çelik, cam, seramik, alüminyum ve kesme tel kullanılmaktadır [1]. Bilye tipleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Bilye tipleri [18].

Bilye Tipi		
Demir içerenler	Çelik Bilye, Yuvarlatılmış Kesme Tel, Paslanmaz Çelik Bilye	
Demir dışı olanalar	Metalik olanlar	Alüminyum, Çinko, Bakır, Bronz
	Metalik olmayanlar	Cam, Kürecik Seramik Bilye

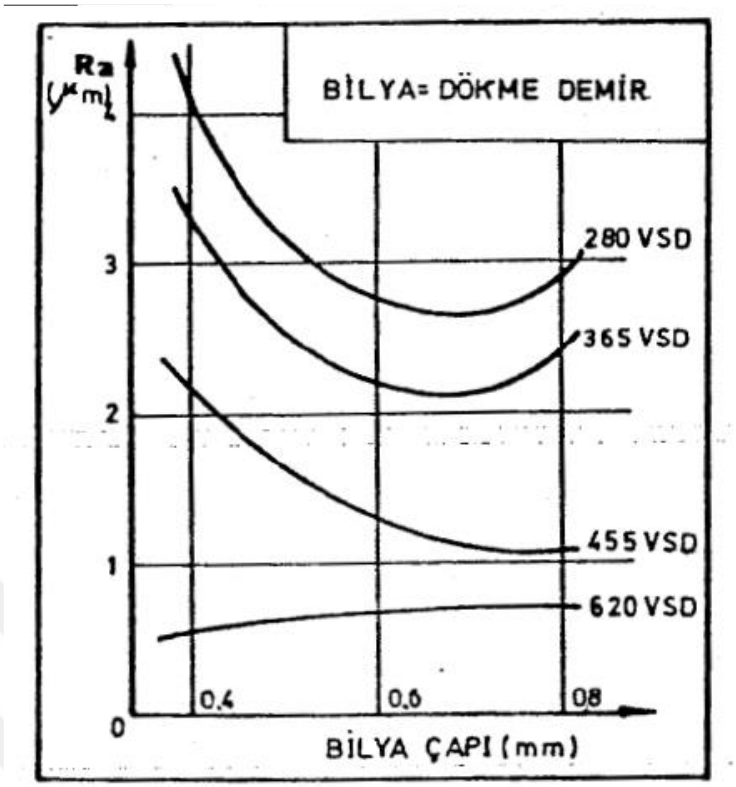
Bilye özellikleri (bilye çapı, türü, sertliği), dövme şiddetini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Bilye boyutu dövülen parçayı hasara uğratmayacak maksimimum büyüklükte olması gereklidir. Bilye çapı arttıkça, diğer dövme parametreleri sabit kabul edilirse dövme şiddeti artmaktadır. Bununla birlikte dövülen parçada plastik deformasyona uğrayan bölgenin kalınlığı da artmaktadır [1].

SAE tarafından hazırlanan standart yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin bir bilye 'S230' olarak tanımlanıyor ise burada 'S' bilyenin çelik olduğunu ifade etmektedir ve '230' değeri bilye çapının inç değerinin 10000 ile çarpılması sonundaki değeri göstermektedir [19]. Şekil 2.4'te SAE standardındaki bilyeler gösterilmiştir.



Şekil 2.4: SAE standardındaki bilyeler [20].

Bilye boyutu dövülen parçanın yüzey kalitesini etkilemektedir. Bilyelerin çarpma enerjisi ve meydana gelen çukur ile yüzey pürüzlülüğü belirlenir. Bilye çapındaki artış çukur büyüklüğünü arttırmaktadır [1]. Şekil 2.5'te bilye çapı arttıkça yüzey pürüzlülüğündeki değişim gösterilmiştir. Bilye çapı arttıkça her zaman yüzey pürüzlülüğü artmamaktadır. Şekil 2.5'te VSD 365 olan malzemede en iyi Ra değeri (ortalama pürüzlülük değeri) 0.6 mm çaplı bilyededir.

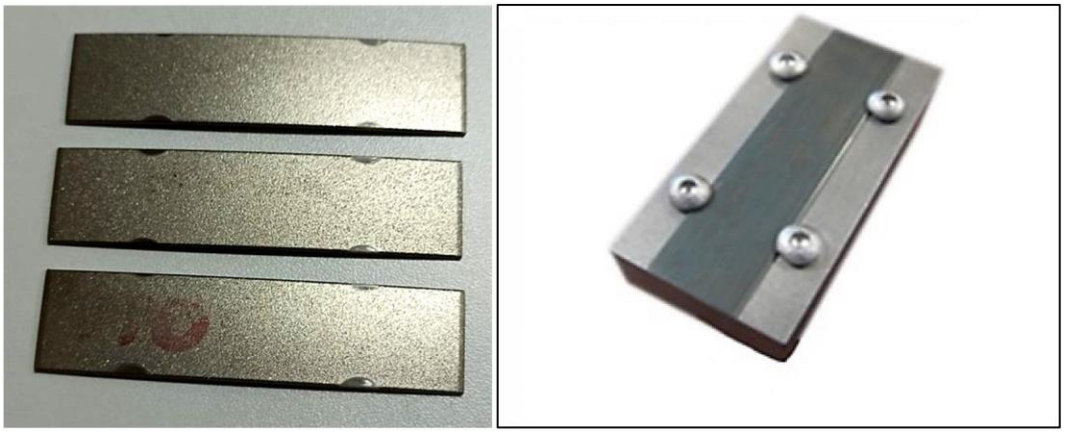


Şekil 2.5: Dökme demirde bilye çapının yüzey kalitesi üzerine etkisi [1].

2.2. Almen şiddeti

John Almen tarafından 1945 yılında Almen testi geliştirilmiştir. Dövme işlemi öncesi sıklıkla kullanılan bir muayene yöntemidir. Bilyeli dövme işleminde fırlatılan bilyelerin aktardığı kinetik enerjiyi ölçmek için kullanılır. Proses parametrelerinin yeterliliğinin tespit edilmesini sağlamaktadır.

Almen şiddetinin ölçülmesinde standart şeritler kullanılır. Almen şeridi tutucuya (Şekil 2.6) sabitlenerek dövme işlemi gerçekleştirilir. Bilyeli dövme ile birlikte şeritte konveks eğilme meydana gelir. Almen şiddeti deformasyona uğrayan şeritlerde meydana gelen eğriliğinin yüksekliği olup Almen ölçüm cihazı ile belirlenir (Şekil 2.7). Bilyeli dövme işleminin Almen şiddetinin ölçülmesi için farklı sürelerde dövme işlemi tekrarlanır. [12].



Şekil 2.6: Almen şeritleri ve Almen tutucu.



Şekil 2.7: Almen ölçüm cihazı.

Almen şiddetinin ölçülmesinde standart şerit tipleri (N: hafif dövme şiddeti, A:orta dövme şiddeti, C: yüksek dövme şiddeti) kullanılmaktadır. Tablo 2.2'de Almen şeridinin özellikleri verilmiştir.

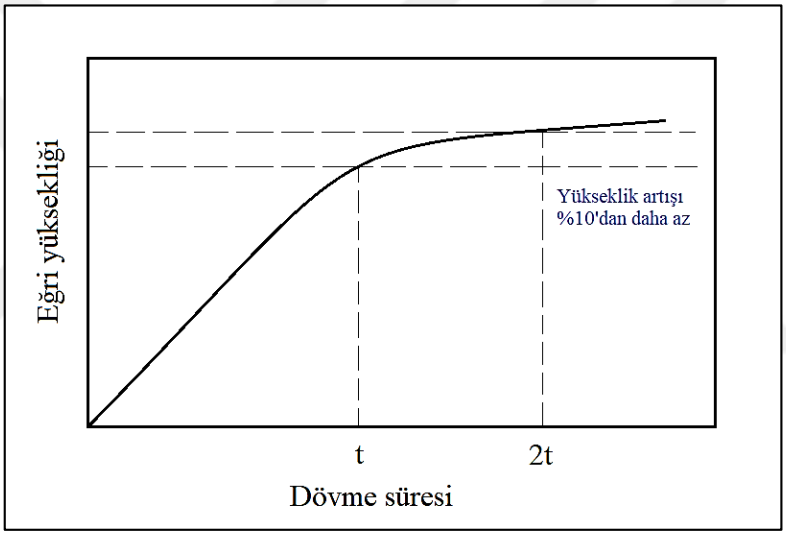
Tablo 2.2: Almen şeritlerinin özellikleri [21].

Şerit adı	Standart	Düzlemsellik	Sertlik	Kalınlık
C	AMS-S 13165	+/- 0.038 mm	44-50 HRC	2.39 mm
A	SAE J442	+/- 0.025 mm	44-50 HRC	1.29 mm
N	SAE AMS 2432	+/- 0.013 mm	45-58 HRC	0.76 mm

Almen şiddeti, Almen şeridindeki dövme işlemi sonucunda meydana gelen sehim miktarının inç biriminde 1000 ile çarpılmasıyla bulunur [22].

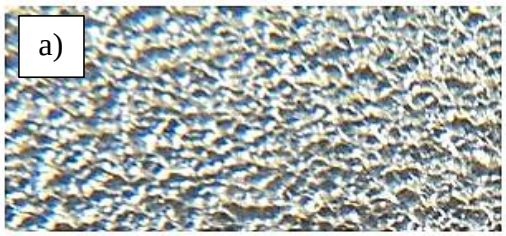
2.3. Yüzey örtme oranı

Bilyeli dövme ile malzeme yüzeyinde bilyelerin etkilediği yüzeyin tüm alana oranı yüzey örtme oranı olarak tanımlanır. Yüzey örtme oranı, bilyeli dövme işleminde sıklıkla kullanılan, homojenlik ve proses güvenliği açısındna önemli bir parametredir. Yüzey örtme oranının genel bir tanımlaması ve standart bir metodu yoktur. Yüzey örtme oranı ile dövme süresi doğru orantılıdır. Pratik olarak dövme süresi iki katına çıkarıldığında şeritte meydana gelen eğri yüksekliği %10'dan daha az ise %100 yüzey örtme oranına ulaştığı kabul edilir [23]. Şekil 2.8'te dövme süresi ile eğri yüksekliği arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 2.8: Dövme süresi-eğrilik yüksekliği grafiğinden yüzey örtme oranı tayini [18].

Yüzey örtme oranı görsel olarak incelemek mümkündür. Şekil 2.9'da tam kaplanan ve eksik kaplanan yüzey görüntüleri örnek olarak verilmiştir. Bazı durumlarda %100 yüzey örtme oranından fazlası istenebilir. Bu durumda belirlenen proses parametreleri ile %100 yüzey örtme oranı için gerekli süre iki katına çıkarılarak bilyeli dövme işlemi yapılır [1].



Tam kaplanmış yüzey



Eksik kaplanmış yüzey

Şekil 2.9: Bilyeli dövme ile tam kaplanan yüzey ve eksik kaplanan yüzey görüntüleri [7].

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzemeler, bilyeli dövme parametreleri, deneysel çalışmalar ve uygulanan muayene yöntemlerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Çalışmada bir çelik ve iki alüminyum alaşımlı malzeme bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuştur. Çelik malzeme S235JR, alüminyum malzemeler ise AA6061 T6 ve AA5754 H111 alüminyum alaşımıdır. Deneysel çalışmada gerçekleştirilen dövme işlemi vakumlu bilyeli dövme makinesinde gerçekleştirilmiştir. Dövme işlemlerinin ardından malzemelerden tahribatlı ve tahribatsız muayeneler için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere bir takım mekanik testler uygulanmışır. Bunlar çekme testi, çentik darbe testi ve mikrosertlik ölçümüdür. Yüzey özelliklerinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. AA 6061 T6 alüminyum alaşımı

Bu çalışmada incelenmek üzere iki alüminyum malzemeden biri olan AA6061 T6 alüminyum alaşımı malzeme, otomotiv, savunma ve uçak sanayisi gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. AA6061 T6 malzemesine ait kimyasal özellikler Tablo 3.1'de ve mekanik özellikler ise Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1: AA6061 T6 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri.

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
Kütlece (%)	0.68	0.44	0.24	0.14	0.94	0.18	0.06	0.04	0.03	Kalan

Tablo 3.2: AA6061 T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
T6	270	310	16	86

3.1.2. AA 5754 H111 alüminyum alaşımı

Bu çalışmada incelenmek üzere iki alüminyum malzemeden bir diğeri AA 5754 H111 alüminyum alaşımı malzemedir. Yüksek kaynak kabiliyeti sebebiyle özellikle kaynaklı birleştirmelerde, yakıt tankı üretimi, gemi ve yat endüstirisi ve raylı taşıtlar gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. AA5754 H111 malzemesine ait kimyasal özellikler Tablo 3.3'te ve mekanik özellikler ise Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.3: AA5754 H111 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri.

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
Kütlece %	0.27	0.36	0.08	0.29	2.8	0.05	0.13	0.04	0.03	Kalan

Tablo 3.4: AA5754 H111 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
H111	126	216	25	86

3.1.3. S235 JR (St37)

Bilyeli dövme işleminin yapılacağı üçüncü malzeme St37 olarak da bilinen S235 JR yapı çeliğidir. Yapı çelikleri endüstiride yaygın olarak kullanılan özellikle çelik yapılarda, kaynaklı işlemlerde, köprü ve demiryollarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı çeliklerinin sıcak haddeleme, normalizayson, gerilim giderme tavlaması, sementasyon gibi özel işlemlerle özellikleri iyileştirilerek kullanıldığı bir çok literatür çalışmasında yer almaktadır. Bu çalışmada bu tür bir malzemeye yer verip incelemeler yapılarak, kullanım alanı geniş ve önemli bir malzeme türünün bilyeli dövme işlemi ile mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği

hakkında detaylı bilgiler verilmesi amaçlanmıştır. S235 JR çeliğine ait kimyasal özellikler Tablo 3.5'te, mekanik özellikleri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.5: S 235 JR Çeliğinin kimyasal özellikleri.

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr
Kütlece (%)	0.09	0.013	0.428	0.020	0.0077	0.034	0.006	0.004	0.022

Tablo 3.6: S 235 JR Çeliğinin mekanik özellikleri.

Malzeme	**Akma Mukavemeti (MPa)**	**Çekme Mukavemeti (MPa)**	**Uzama (%)**	**Sertlik (HV)**
S235JR	297	377	44	167

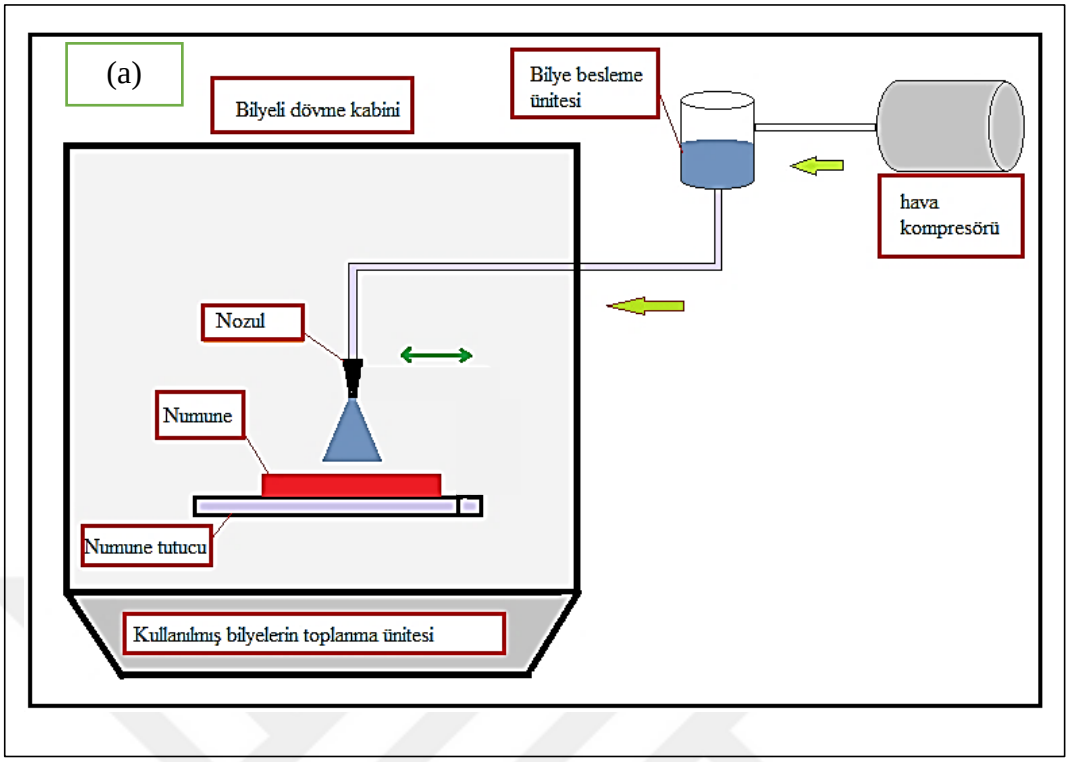
3.2. Bilyeli Dövme İşlemi Parametreleri

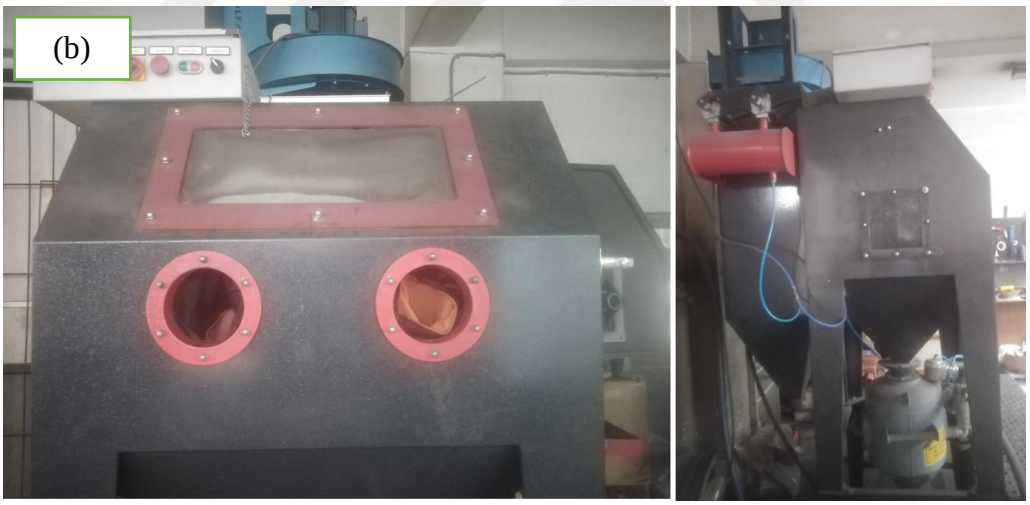
Bilyeli dövme işlemi Sigma marka SGM-1000G model vakumlu tip bilyeli dövme makinesinde yapılmıştır. Bilyelerin vakumlanarak ile Şekil 3.1'de de bilyeli dövme makinesinin teknik özellikleri ve bilyeli dövme işlemi yer almaktadır. Manuvel ayarlamalı olan makine için geliştirilen düzenek ile plakalara bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyeli dövme işleminin çalışma prennsibine ait şematik gösterimi ve vakumlu bilyeli dövme makinesi Şekil 3.2'de verilmiştir. Görselden de anlaşılacağı üzere kompresör yardımı ile basınçlı hava bilye besleme ünitesinden aldığı bilyeleri sabitlenmiş iş parçasına püskürterek dövme işlemini gerçekleştirir.



Model	SGM-1000G
Boyutlar: W x H x D	1420-2600 x 1880 x 1000-4500 mm
Özellikler	Vakumlu Tip
	Manuel Ayarlamalı
	Full Scale Basınç Kontrollü
	Kauçuk Membran Akış Kontrolü
	Jet-Pulse Kartuş Filte Sistemi
Tank Kapasitesi	100 litre
Kumlama Kabini Boyutları: W x H x D	1255 x 970 x 935 mm
Püskürtme Basıncı	0 < > 12 bar
Çalışma Sıcaklığı	15°C < > 30°C
Abrasivler	Tüm yaygın aşındırıcılarla kullanıma uygundur.

Şekil 3. 1: Bilyeli dövme işlemi ve makine teknik özellikleri.





Şekil 3. 2: Bilyeli dövme işlemi (a) Şematik gösterimi (b) Vakumlu bilyeli dövme makinesi.

Çalışmada kullanılan bilyeler SAE (Society of Automobile Engineers) tarafından belirlenen standarda uygun olarak seçilmiştir. Deney işlemlerinde kullanılan bilyelere ait fiziksel özellikler Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: Deneylerde kullanılan bilye özellikleri.

SAE No	Nominal Çap (mm)	Bilye Sertliği (HRC)	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Kristal Şekli	SEA J444 Elek Analizi	
					Elek (mm)	Tolerans
S170	0.42	40-55	7.2	Martenzitik	0.85 20 No Elekten	Tamamı
					0.71 25 No Elekten	Max. %10
					0.43 35 No Elekten	Min. %85
					0.36 40 No Elekten	Min %97
S230	0.60	40-55	7.2	Martenzitik	1.00 18 No Elekten	Tamamı
					0.85 16 No Elekten	Max. %10
					0.60 30 No Elekten	Min. %85
					0.50 35 No Elekten	Min. %97
S330	0.84	40-55	7.2	Martenzitik	1.40 14 No Elekten	Tamamı
					1.18 16 No Elekten	Max. %5
					0.85 20 No Elekten	Min. %85
					0.71 25 No Elekten	Min. %96

Tez çalışmasında işlem parametreleri 3 farklı tane büyüklüğüne sahip (S170, S230 ve S330) bilyelerle, üç farklı basınçta (4, 6 ve 8 bar) ve %100 yüzey örtme oranında dövülmüştür. Ayrıca yüzey örtme oranının bilyeli dövmedeki etkisinin incelenmesi amacıyla 6 bar basınçta yapılan dövme işlemi yüzey örtme oranı %200'e çıkartılarak tekrar uygulanmıştır. Tablo 3.7'de belirlenen parametreler ve bu parametreler sonucunda elde edilen Almen şiddeti değerleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Eğrilik yüksekliği 1000 ile çarpılarak Almen şiddeti ifade edilir.

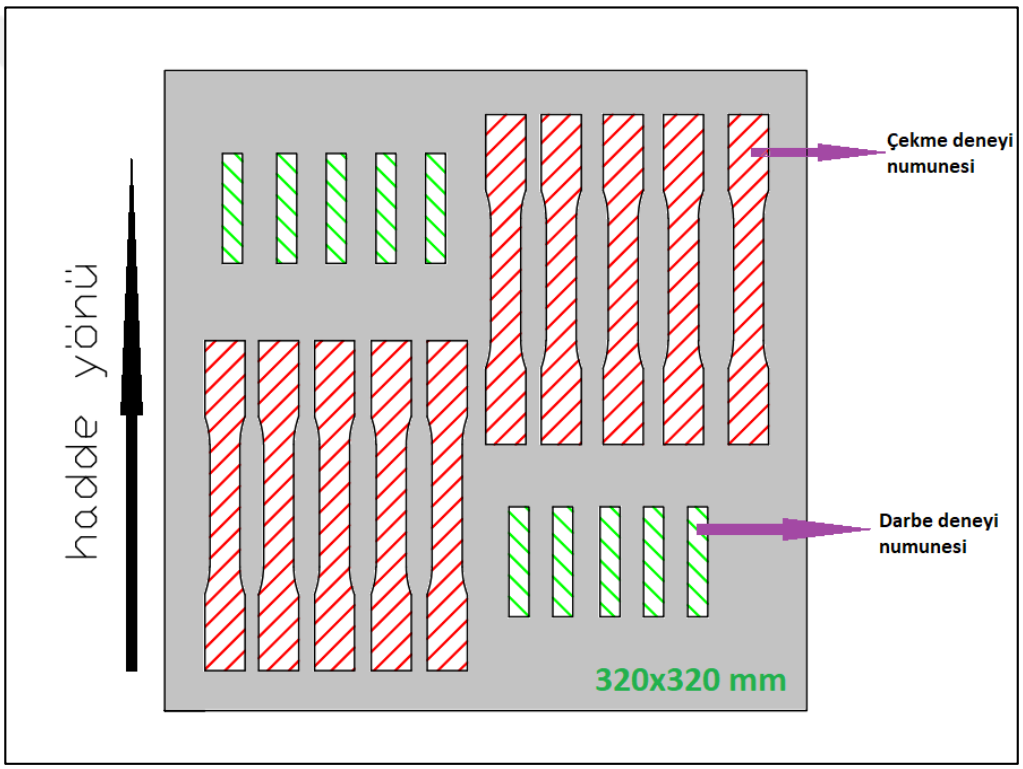
Tablo 3.8: Bilyeli dövme işlem parametreleri.

Malzeme	Bilye ölçüsü	Yüzey örtme oranı (%)	Püskürtme Basınç (bar)	Eğri yüksekliği (inç)	Süre (sn)	Almen Şiddeti (A)
AA6061 T6	S170	100	4	0.0137	60	14A
	S170	100	6	0.0167	73	17A
	S170	100	8	0.0179	97	18A
	S170	**200**	6	0.0167	146	17A
	S230	100	4	0.0146	51	15A
	S230	100	6	0.0157	64	16A
	S230	100	8	0.0187	72	19A
	S230	**200**	6	0.0157	128	16A
	S330	100	4	0.0183	58	18A
	S330	100	6	0.0245	70	24A
	S330	100	8	0.0276	81	28A
	S330	**200**	6	0.0245	140	24A
AA5754 H111	S170	100	4	0.0137	60	14A
	S170	100	6	0.0167	73	17A
	S170	100	8	0.0179	97	18A
	S170	**200**	6	0.0167	146	17A
	S230	100	4	0.0146	51	15A
	S230	100	6	0.0157	64	16A
	S230	100	8	0.0187	72	19A
	S230	**200**	6	0.0157	128	16A
	S330	100	4	0.0183	58	18A
	S330	100	6	0.0245	70	24A
	S330	100	8	0.0276	81	28A
	S330	**200**	6	0.0245	140	24A
S235JR	S170	100	4	0.0137	60	14A
	S170	100	6	0.0167	73	17A
	S170	100	8	0.0179	97	18A
	S170	**200**	6	0.0167	146	17A
	S230	100	4	0.0146	51	15A
	S230	100	6	0.0157	64	16A
	S230	100	8	0.0187	72	19A
	S230	**200**	6	0.0157	128	16A
	S330	100	4	0.0183	58	18A
	S330	100	6	0.0245	70	24A
	S330	100	8	0.0276	81	28A
	S330	**200**	6	0.0245	140	24A

3.3. Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

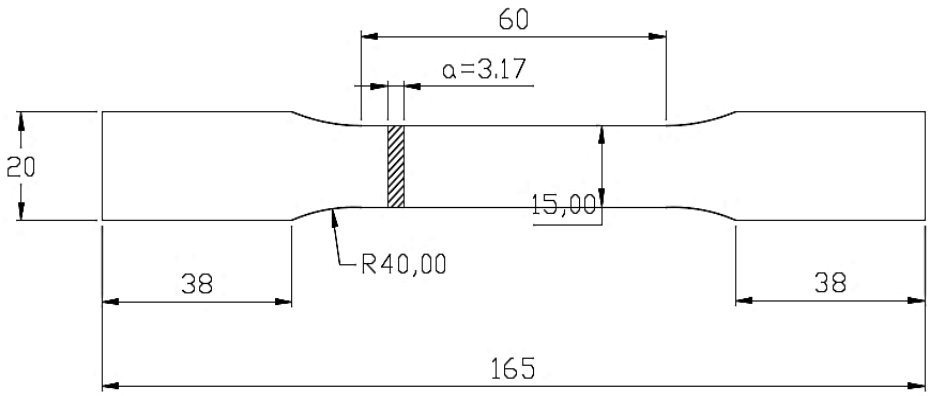
Bilyeli dövme işlemi ile malzemelerde meydana gelecek mekanik değişimlerin tespiti ve analizi için her numuneye bilyeli dövme işleminden önce ve sonra çekme testi işlemi yapılmıştır. Çekme testi her numune için üç defa yapılmış ve ortalamaları alınarak sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Bilyeli dövme işlemi öncesinde 320x320x3mm levha formunda numuneler hazırlanmıştır. Bilyeli dövme işlemine tabii tutulan levha numuneler fiber lazer kesim makinesiyle (HD-F 3015) çekme ve darbe numuneleri hazırlanmıştır. Levha üzerinden alınan numuneler Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 3: Levhaların bilyeli dövme işleminden sonra üzerinden test numuneleri alınması.

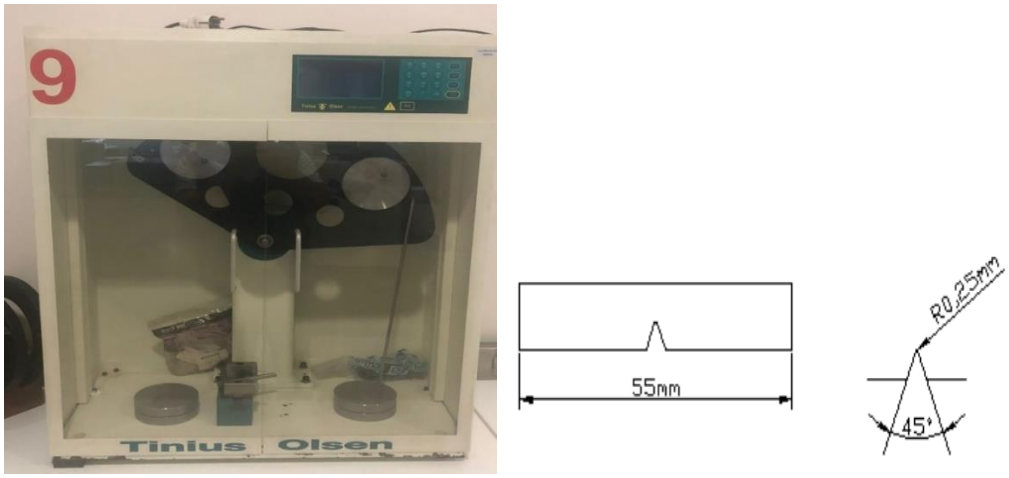
Çekme numumelerinin boyutları ISO 6892-1'e göre hazırlanmıştır (Şekil 3.3). Hazırlanan çekme numuneleri LPM-3M polisaj makinası ile 120 meshlik zımparalar takılarak lazer kesimi sırasında oluşan kesim izleri düzeltilmiştir. Çekme deneyleri ise Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Laboratuvarında SHIMADZU AG-IC marka çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 4: Çekme numunesi boyutları (ISO 6892-1).

3.4. Darbe Deneyi

Darbe deneyi numuneleri sac plaka üzerinde TS EN ISO 148 standardına göre lazer kesim makinasında kesilerek çapakların temizlenmesi işlemi, çekme numunelerinde uygulanan yöntemle (LPM-3M polisaj makinası ile 120 meshlik zımparada) gerçekleştirilmiştir. Darbe testi numunelerine V çentik açma işlemi frezede açılmıştır. Deneyler "Tinius Olsen" marka darbe cihazında tamamlanmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3. 5:Darbe deneyi test cihazı ve test numunesi.

3.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Bilyeli dövme işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi için ART300 cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3. 6: Yüzey pürüzlülük ölçümü.

3.6. Mikrosertlik Deneyi

Bilyeli dövme işlemi uygulanmış üç farklı malzeme numuneleri dövme işlemi sonrasında dikey kesitleri üste gelecek şekilde bakalite alınarak zımparalanıp parlatılmış olarak mikro sertlikleri ölçülmüştür. Bakalite alınan numunelere ait görsel Şekil 3.7'da verilmiştir.



Şekil 3. 7: Sertlik ölçümleri için bakalite alınan numunelere ait görsel.

Ölçümler numunelerin dövülen dış sert yüzey kesitinden orta merkeze doğru tekrarlı şekilde yapılmıştır. Her 0.5 mm aralıklar ile 500 gram yük altında 15 saniye bekletilerek mikrovikers sertlik ölçme yöntemi ile sertlik taramaları yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı makineye ait görsel Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3. 8: Mikrosertlik deneyi test cihazı.

3.7. SEM Analizi

Bilyeli dövme ile yüzey özelliklerinin incelenmesi için dövülen plaka formundaki malzemelerden 10x10 mm boyutunda numuneler alınarak JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3. 9: Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

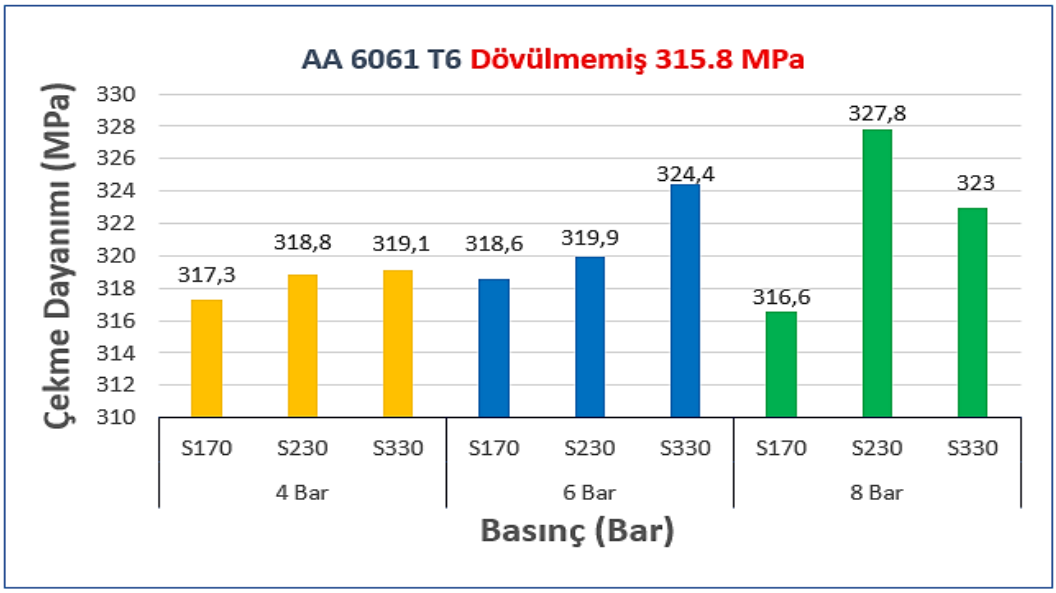
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

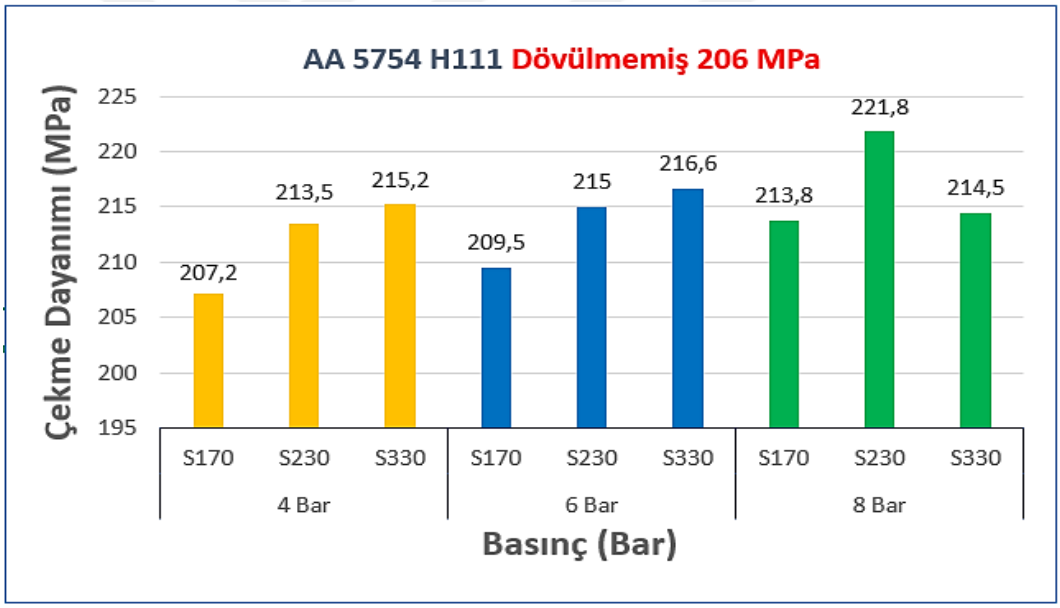
4.1.1. Çekme deneyi sonuçları

AA6061 T6, AA5754 H111 ve S235JR numuneleri S170, S230 ve S330 çelik bilyeler kullanılarak 4, 6 ve 8 bar püskürtme basıncında bilyeli dövme işlemi neticesinde kaydedilen çekme testi sonuçları Tablo 4.1'de yer verilmiştir. Bilyelerin basınç ve yüzey örtme oranı ile deney parçasının yüzeyine uyguladıkları bombardımanın etkisi ile mekanik özellikleri doğrudan etkilemiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken, yüzey örtme oranındaki değişimin incelenmesi için %200 yüzey örtme oranında da 6 bar basınçta deneyler yapılmış ve sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

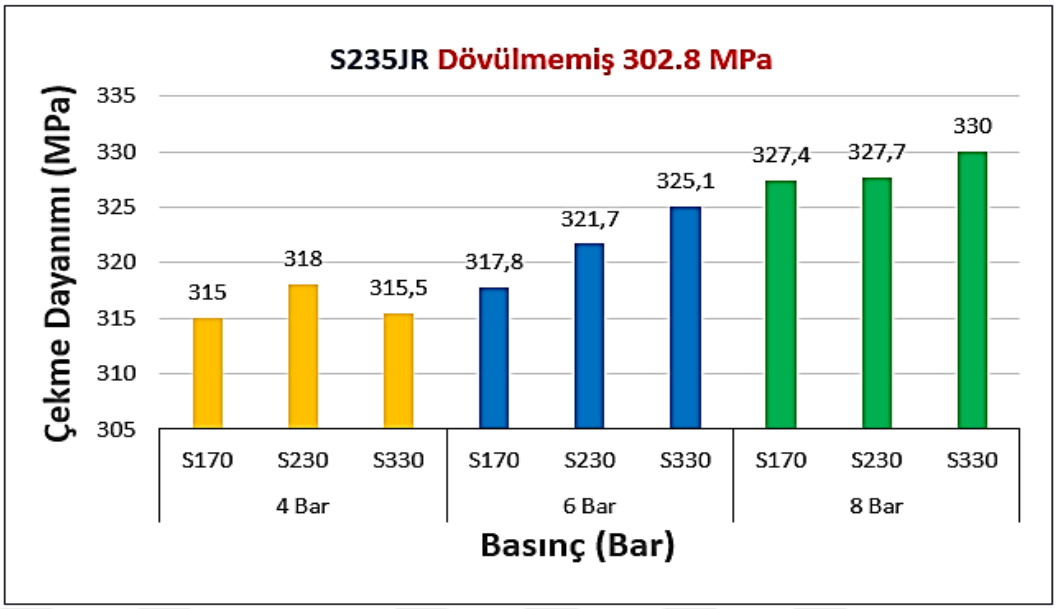
Çekme mukavemetindeki artış Almen şiddetiyle doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Buradaki artış pekleşme sonucunda, yüzeyde meydana gelen artık basma gerilmesi oluşumu ve tane yapılarındaki plastik deformasyonlar ile ilişkilendirilebilir. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sabit basınç altında %100 yüzey örtme oranında, farklı bilye türlerinin (S170, S230, S330) çekme dayanımlarına etkilerini gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 4.1: Bilyeli dövme ile AA 6061 T6 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.



Şekil 4.2: Bilyeli dövme ile AA 5754 H111 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.

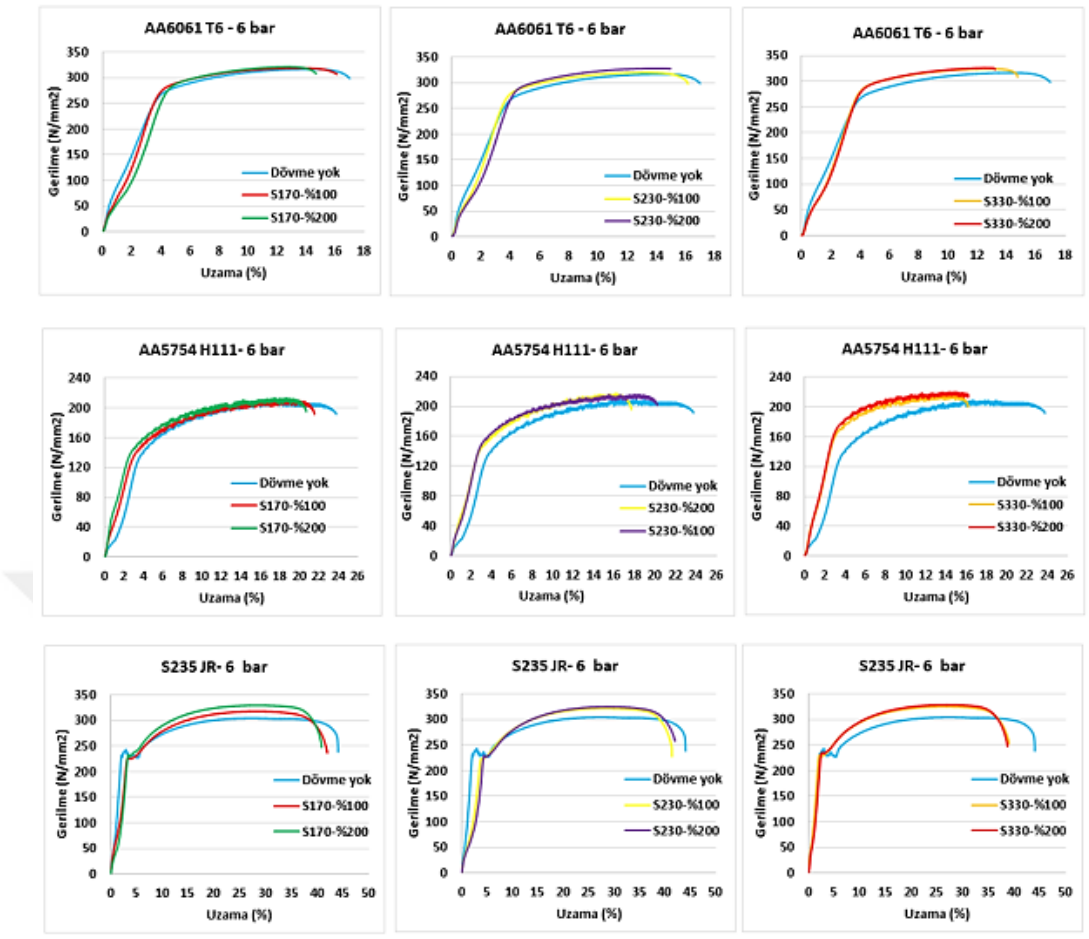


Şekil 4.3: Bilyeli dövme ile S235 JR numunelerinin çekme deneyi sonuçları.

AA6061 T6, AA5754H111 ve S235JR malzemelerin S170, S230 ve S330 çelik bilyeler kullanılarak 4, 6 ve 8 bar püskürtme basınçlarında bilyeli dövme işlemi neticesinde kaydedilen çekme testi sonuçları Şekil 4.1 ile Şekil 4.3'te ve Tablo 4.1'de yer almaktadır. Bilyelerin yüzeye uyguladıkları bombardımanın etkisi mekanik özellikleri doğrudan etkilemiştir. Çekme mukavemetindeki artış Almen şiddetiyle doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Buradaki artış pekleşme sonucunda yüzeyde meydana gelen artık basma gerilmesi oluşumu ve tane yapılarındaki plastik deformasyonlar ile ilişkilendirilebilir.

En yüksek çekme dayanımları alüminyum alaşımlı malzemelerde 8 bar basınçta S230 bilye ile gerçekleşirken, S235JR çelik malzemede 8 bar'da S330 bilyede gerçekleşmiştir.

Çekme deneyi sonuçları 6 bar basınçtaki çekme grafikleri Şekil 4.4'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4: Farklı örtücülük oranlarında ve 6 barda Çekme testi sonuçları.

Tablo 4.1: Çekme testi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100).

Numune	Bilye türü	Basınç (bar)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AA6061 T6	**Dövülmemiş**	--	**315.8**	**16.8**
	S170	4	317.3	16.0
	S170	6	318.6	15.0
	S170	8	316.6	13.2
	S230	4	318.8	16.6
	S230	6	319.9	16.2
	S230	8	327.8	15.0
	S330	4	319.1	15.4
	S330	6	324.4	14.3
	S330	8	323.0	14.3
AA5754 H111	**Dövülmemiş**	--	**206**	**24,7**
	S170	4	207,2	24
	S170	6	209,5	21,8
	S170	8	213,8	19,8
	S230	4	213,5	20,8
	S230	6	215	19,8
	S230	8	221,8	18
	S330	4	215,2	20,2
	S330	6	216,6	18,2
	S330	8	214,5	18,4
S235JR	**Dövülmemiş**	--	**302,8**	**44,2**
	S170	4	315,0	42
	S170	6	317,8	41,8
	S170	8	327,4	41,5
	S230	4	318,0	41,4
	S230	6	321,7	41
	S230	8	327,7	38,8
	S330	4	315,56	39
	S330	6	325,1	38,6
	S330	8	330,04	36,8

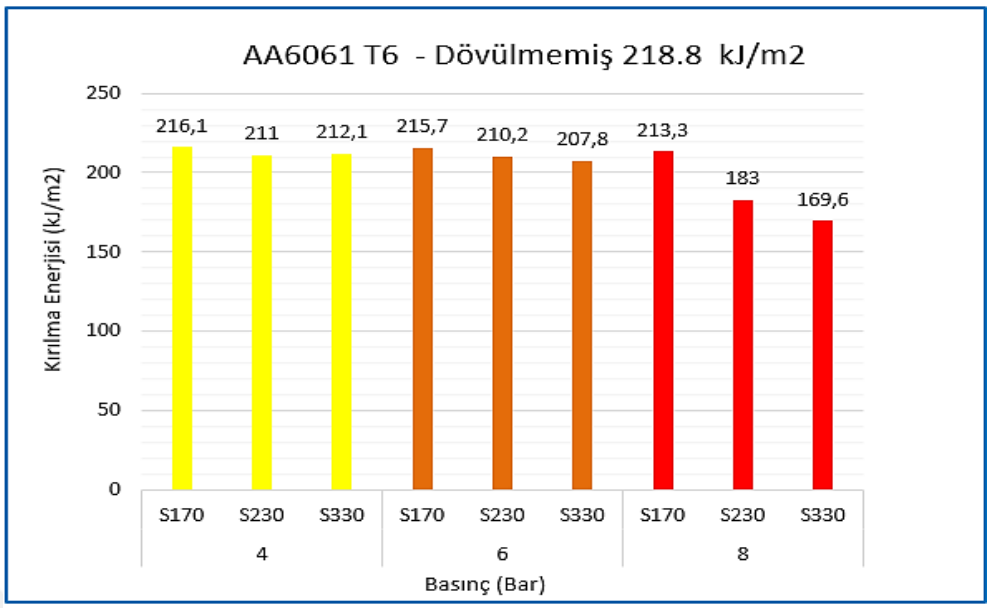
Tablo 4.2: Sabit basınçta yüzey örtme oranı göre çekme testi sonuçları.

Numune	Bilye	Basınç (bar)	Yüzey örtme oranı	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AA6061 T6	**Dövülmemiş**	--		**315.8**	**16.8**
	S170	6	%100	318.6	16.0
			%200	321.3	14.6
	S230	6	%100	319.9	16.2
			%200	328.0	14.7
	S330	6	%100	324.4	14.7
			%200	326.5	13.1
AA5754 H111	**Dövülmemiş**	--		**206**	**24.7**
	S170	6	%100	209,5	21.8
			%200	212.2	20.4
	S230	6	%100	215	19.8
			%200	217.5	17.4
	S330	6	%100	216,6	16.8
			%200	219.5	16.1
S235JR	**Dövülmemiş**	--		**302,8**	**44.2**
	S170	6	%100	317,8	41.8
			%200	329.4	40.8
	S230	6	%100	321,7	41
			%200	324.7	41
	S330	6	%100	325,1	38.6
			%200	328.5	38.5

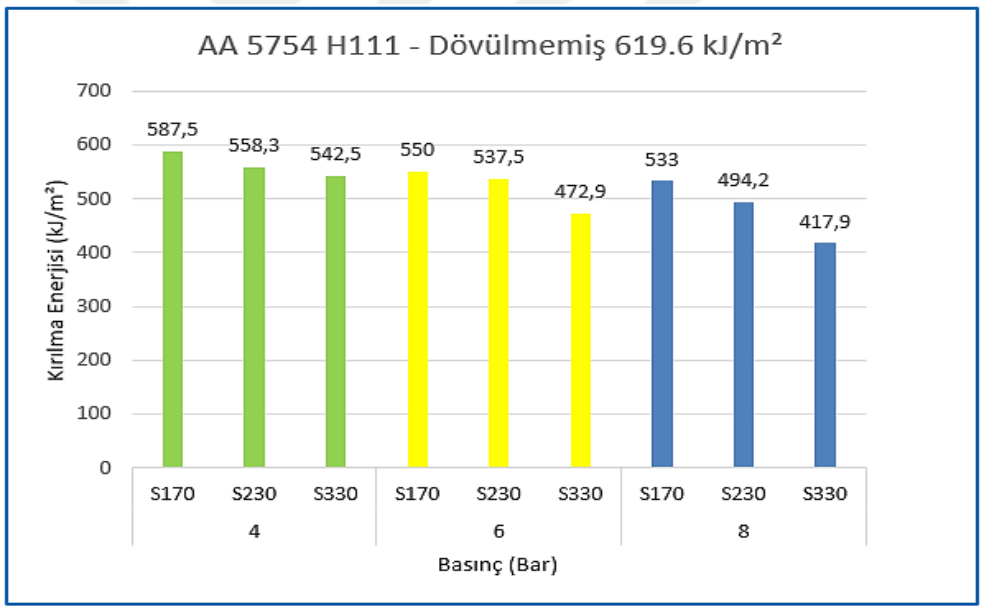
Çekme testi sonuçlarına göre tüm deney numunelerinde %200 örtme oranında çekme dayanımında artış gözlenmektedir. %100 örtme oranında bilyelerin tane büyüklüklerinin artması ile çekme dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir.

4.1.2. Darbe deneyi sonuçları

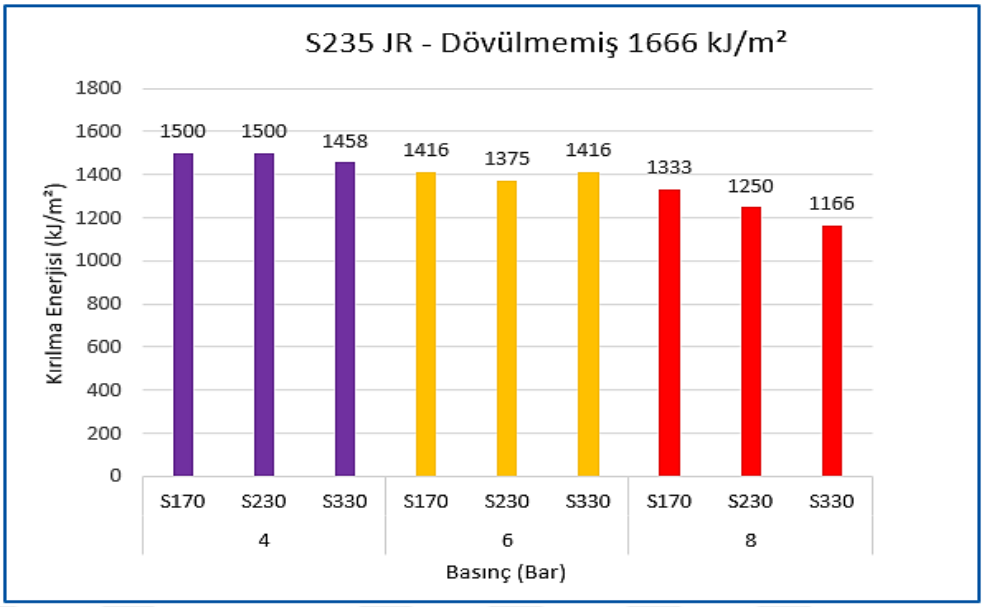
AA6061 T6, AA5754H111 ve S235JR malzemelerin S170, S230 ve S330 çelik bilyeler ile 4, 6 ve 8 bar basınçta dövülmesiyle gerçekleşen darbe deneyi sonuçları Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5: AA6061 T6 darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100).



Şekil 4.6: AA5754 H111 darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100).



Şekil 4.7: S235 JR darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı:%100).

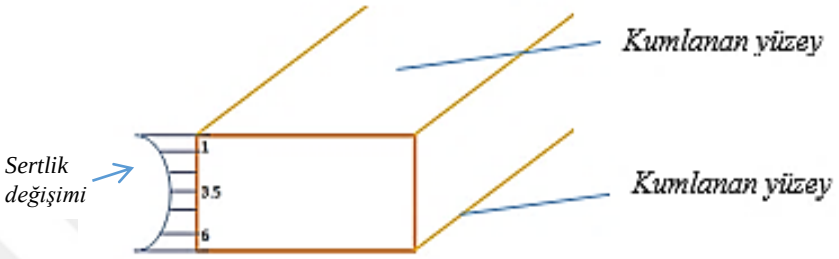


Şekil 4.8: Darbe deneyi sonuçları (Yüzey örtme oranı: %100 ve %200).

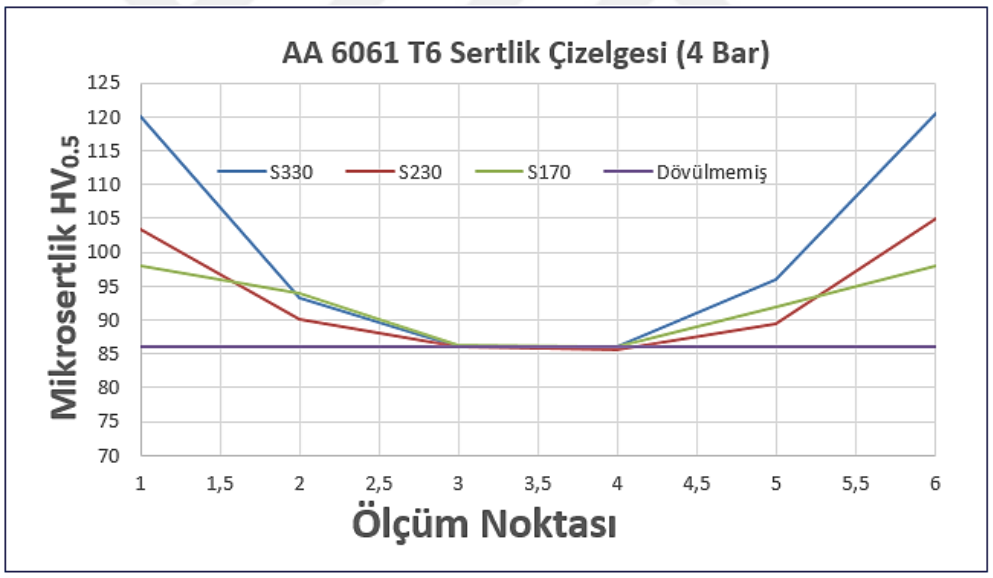
Çentikli darbe deneyi sonucunda bütün numunelerde bilye çapı arttıkça darbe dayanımlarında (kırılma enerjileri) düşme gözlenirken, püskürtme basıncının ve örtücülük oranının (%200) artması durumunda da darbe dayanımında düşüş sergilenmiştir. Bu durum numunelerin bilyeli dövme işlemi sonunda numune yüzeylerinde oluşan sertlik artışı ile beraber gevrekliğin de arttığını göstermektedir.

4.1.3. Mikrosertlik sonuçları

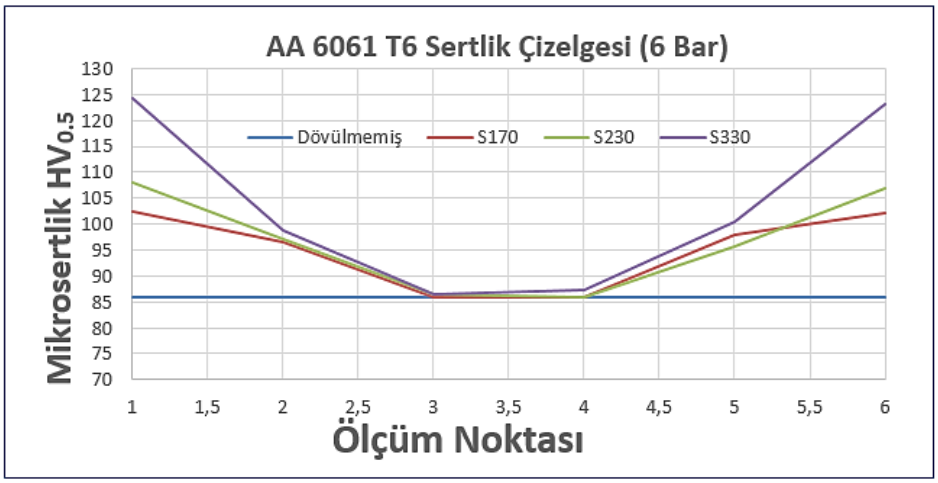
Numunelerin yanal kesitinden kalınlık boyunca eşit aralıklı altı noktadan mikro sertlik ölçümü yapılmıştır. Tüm numunelerde sertliklerin yüzeyden merkeze doğru tedrici olarak azaldığı tespit edilmiştir. Püskürtme basıncı ve bilye çapı arttıkça sertliklerde artış gözlemlenmiştir.



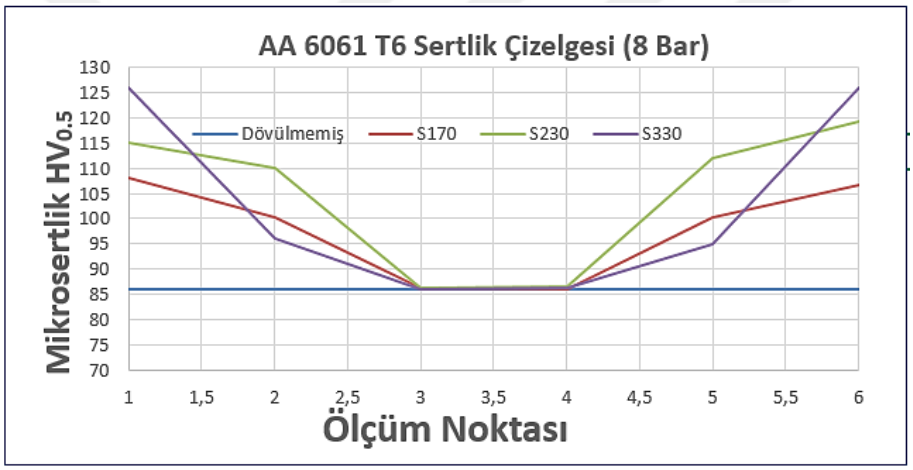
Şekil 4.9: Mikro sertlik ölçümünün şematik gösterimi.



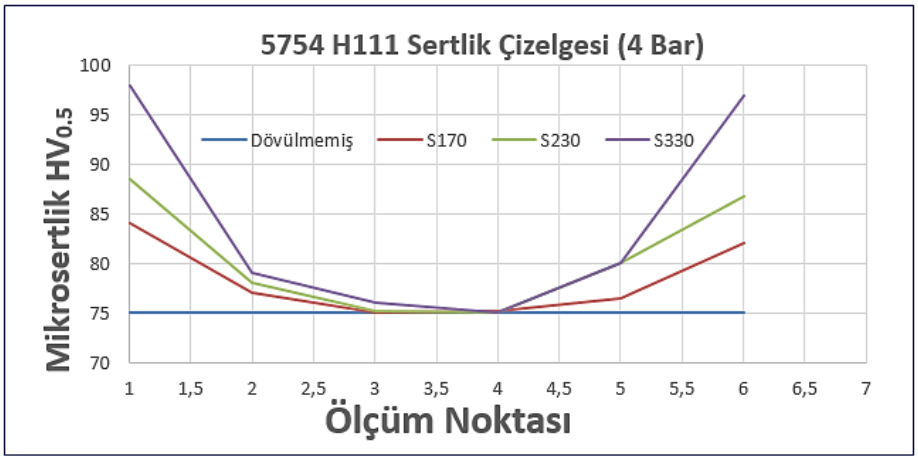
Şekil 4.10: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar).



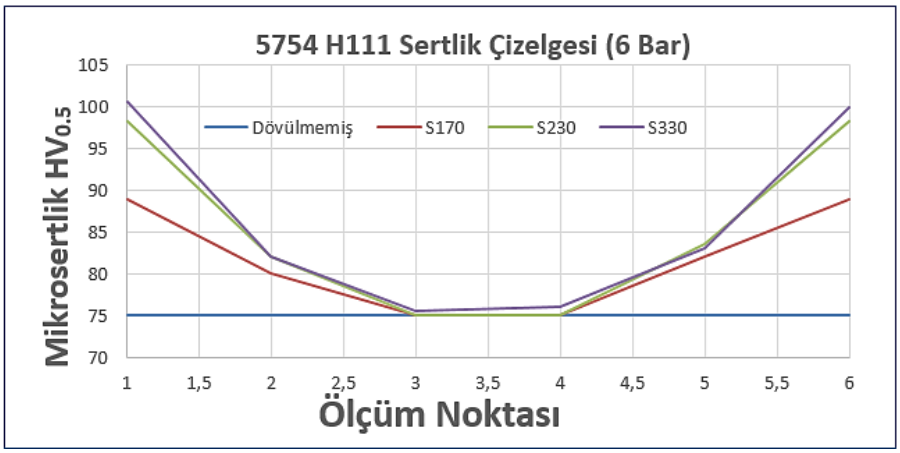
Şekil 4.11: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar).



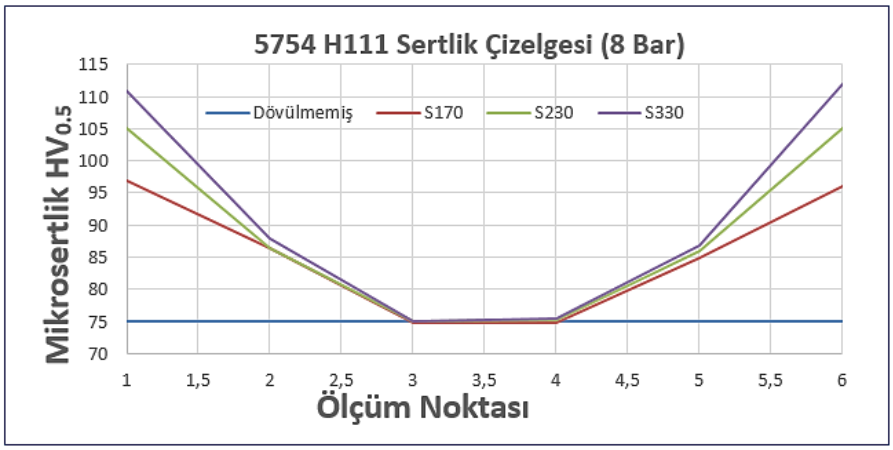
Şekil 4.12: AA6061 T6 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (8 bar).



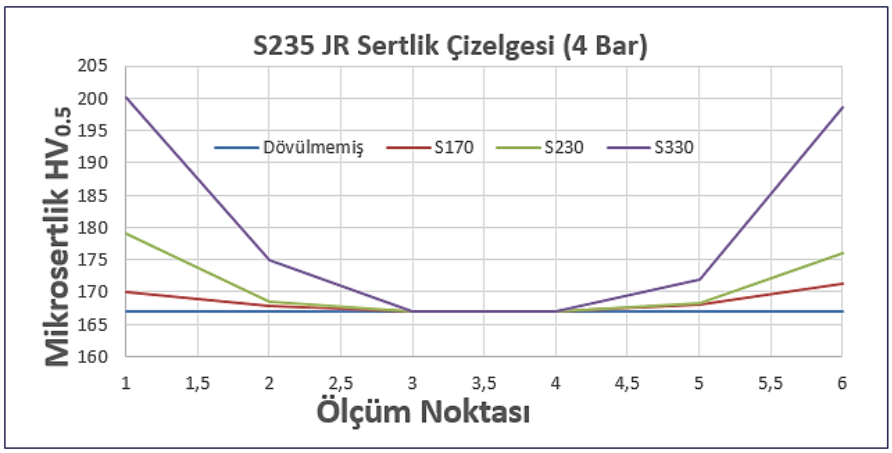
Şekil 4.13: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar).



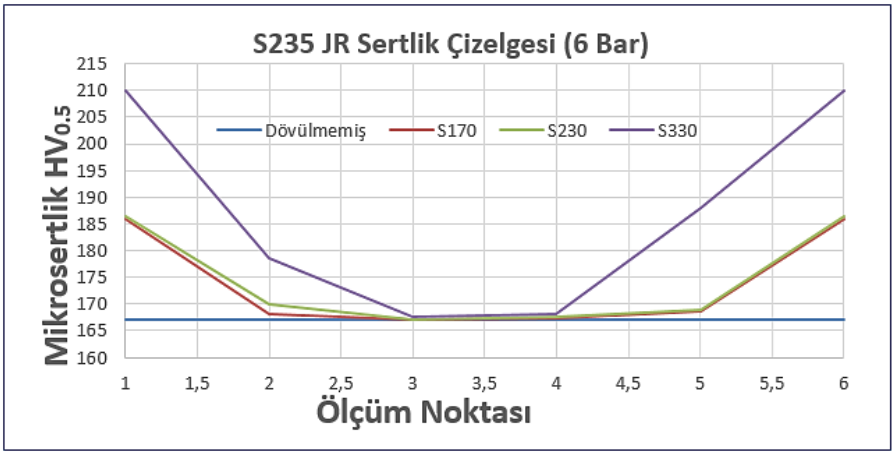
Şekil 4.14: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar).



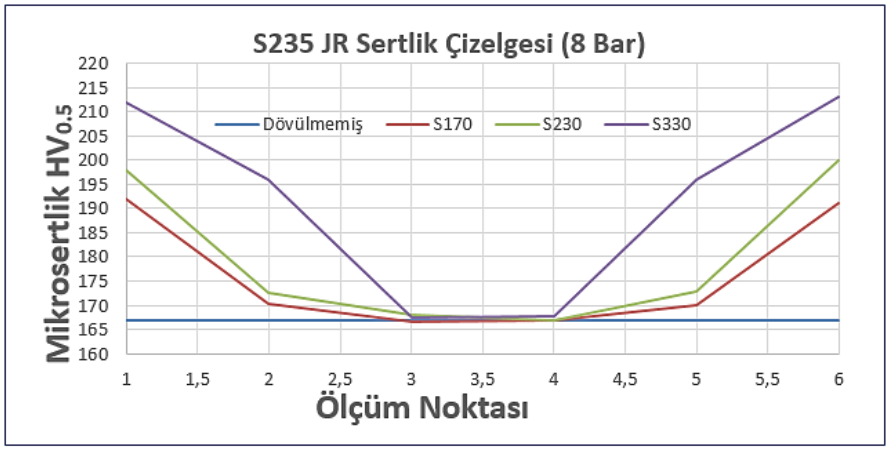
Şekil 4.15: AA5754 H111 malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar).



Şekil 4.16: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (4 bar).



Şekil 4.17: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (6 bar).



Şekil 4.18: S235 JR malzemesinin bilyeli dövme ile mikrosertlik sonuçları (8 bar).

Tablo 4.3: Numunelerin S330'a ait yüzey sertlikleri ve sertlik artış oranı.

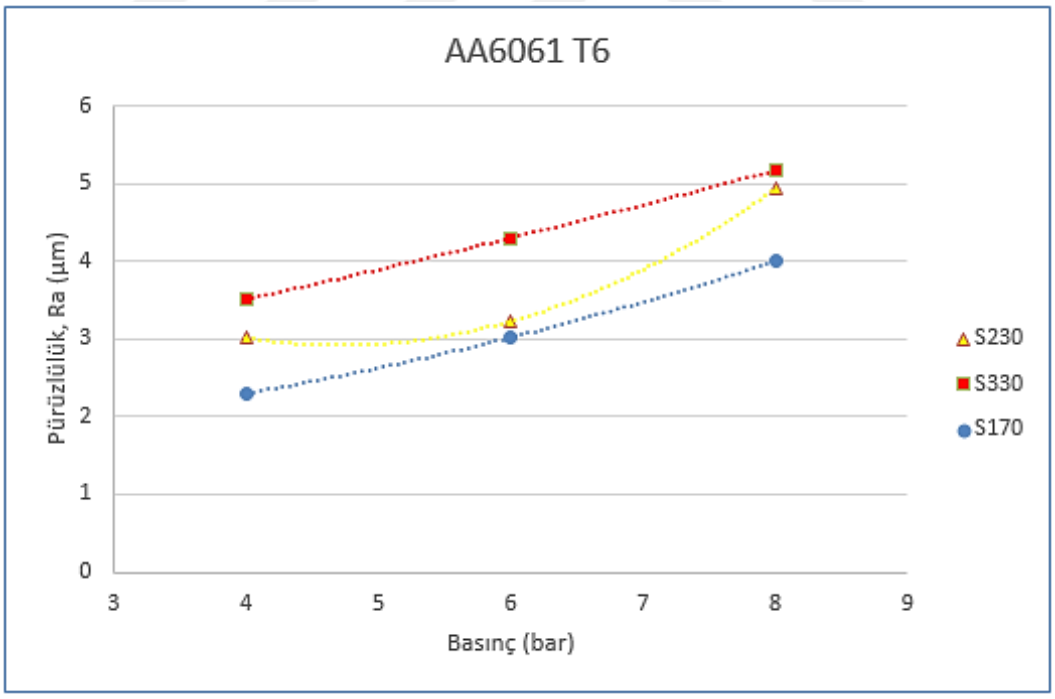
Püs. Basıncı (bar)	**AA6061 T6 (HV)**		**AA5754 H111 (HV)**		**S235JR (HV)**	
Dövülmemiş	86		75		167	
4	**120**	%39.53	**97.5**	%30.00	**200**	%19.76
6	**124**	%44.19	**101**	%34.67	**210**	%25.75
8	**126**	%46.51	**102**	%36.00	**213**	%27.55

Çalışmada üç farklı basınçta en yüksek yüzey sertliği S330 bilyede yani en yüksek bilye çapında meydana gelmiştir (Tablo 4.3). Mikro sertlikler incelendiğinde dövülmemiş numuneye göre en yüksek sertlik artış oranı 8 bar basınçta %46.51 ile AA6061 T6 malzemede gözlenirken, en düşük sertlik artışı 4 bar basınçta S235JR malzemede gözlenmiştir.

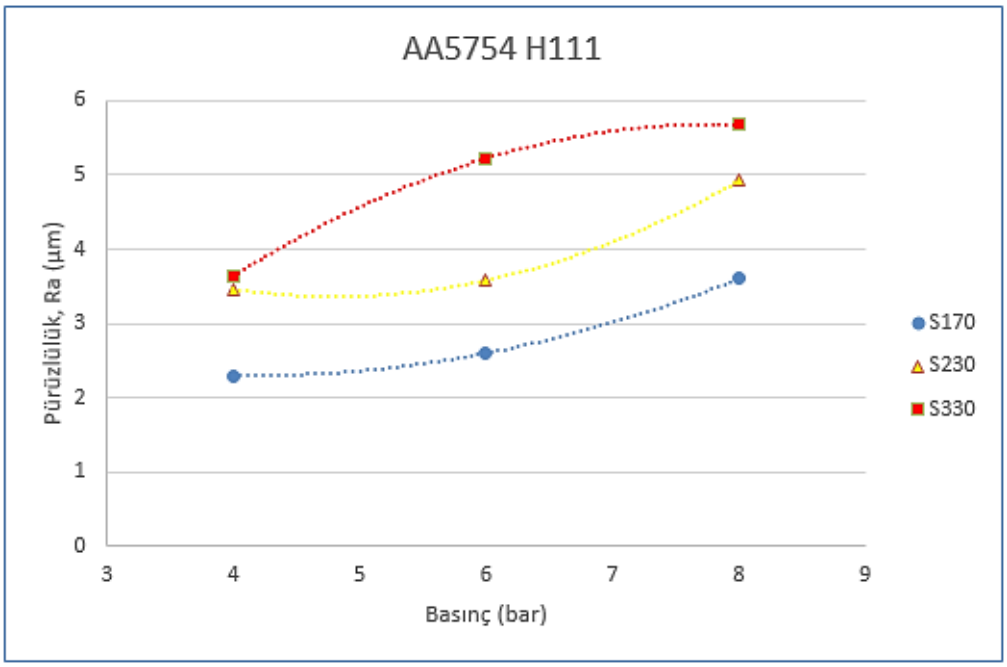
4.2. Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

4.2.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

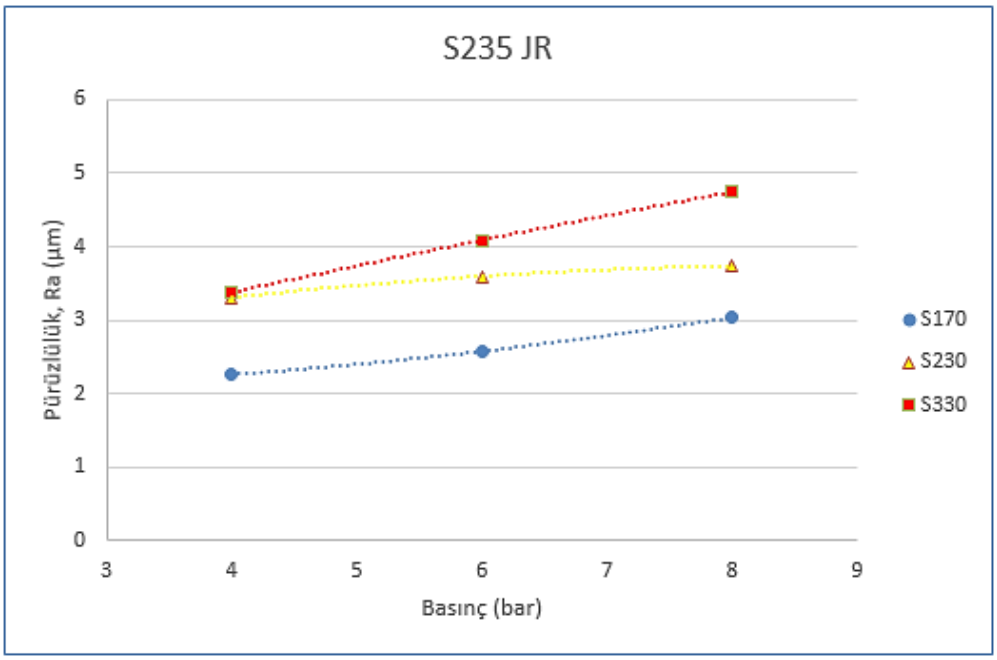
Bilyeli dövme işlemi bu çalışmada mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik yapılmaktadır. Fakat parça yüzeyinin işlem sonunda kullanılacağı yere uygunluk açısından da değerlendirilmesi yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda numunelerin yüzey pürüzlük değerinde artış meydana gelmiştir. S170, S230 ve S330 çelik bilyelerde yapılan dövme sonucunda Ra (ortalama pürüzlülük) değerinde meydana gelen değişim Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19: AA6061 T6 numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü.



Şekil 4.20: AA5754 H111 numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü



Şekil 4.21: S235 JR numunesinin farklı basınçlardaki bilyeli dövme işlemi sonundaki yüzey pürüzlülüğü.

Püskürtme basıncının artışı ile tüm numunelerde yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenmiştir. Bilye çapının artışı ile yüzey pürüzlülüğü alüminyum malzemelerde doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Bu durum çelik malzemede de benzer özellik göstermiştir.

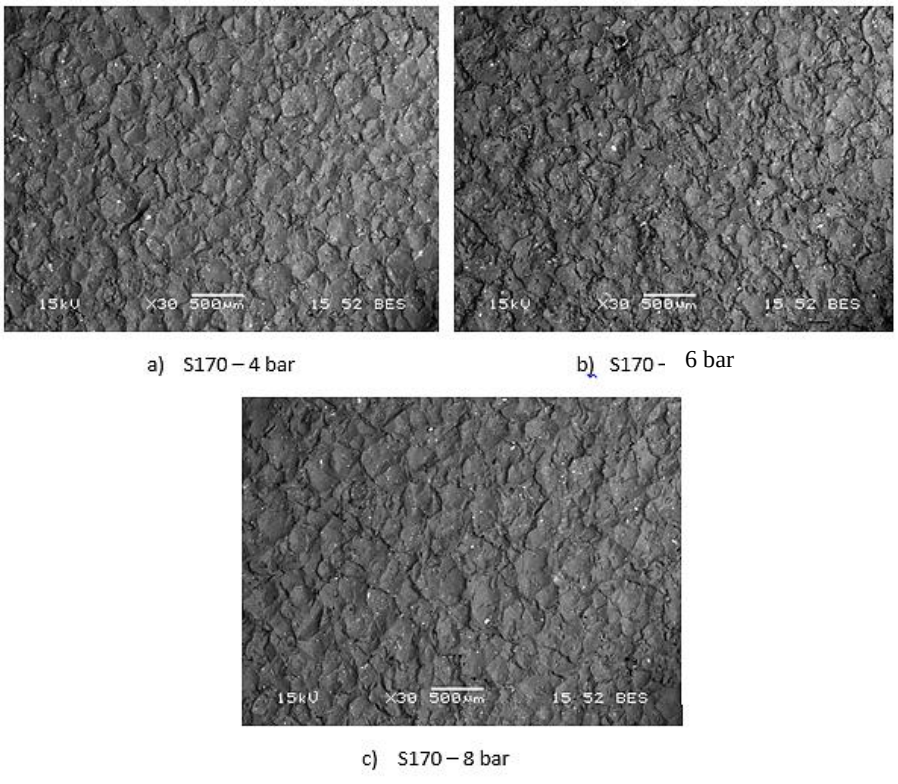
Tablo 4.4: Numunelerin S330'a ait yüzey pürüzlülük ve artış oranı.

Püs. Basıncı (bar)		**AA6061 T6 (Ra)**		**AA5754 H111 (Ra)**		**S235JR (Ra)**	
Dövülmemiş		0.11		0.27		1.17	
S330	4	**3,51**		**3.64**		**3.38**	
	6	**4.3**	%22.50	**5.22**	%43.40	**4.09**	%21.00
	8	**5.17**	%47.29	**5.68**	%56.04	**4.75**	%40.53

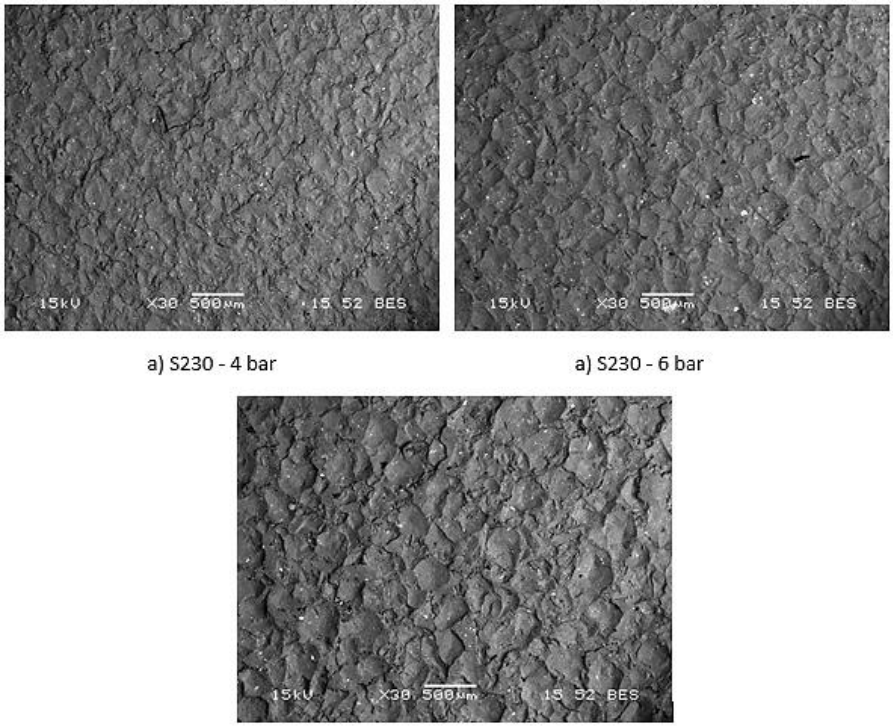
Çalışmalarda üç farklı basınçta en yüksek yüzey pürüzlülüğü S330 bilyede yani en yüksek bilye çapında meydana gelmiştir (Tablo 4.4).

4.2.2. SEM analizine göre yüzey özellilkeri

AA6061 T6, AA5754 H111 ve S235 JR malzemelerinin bilyeli dövme işlemi sonucunda yüzey özelliklerinde meydana gelen değişim SEM görüntüleriyle incelenmiştir.



Şekil 4.22: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm).

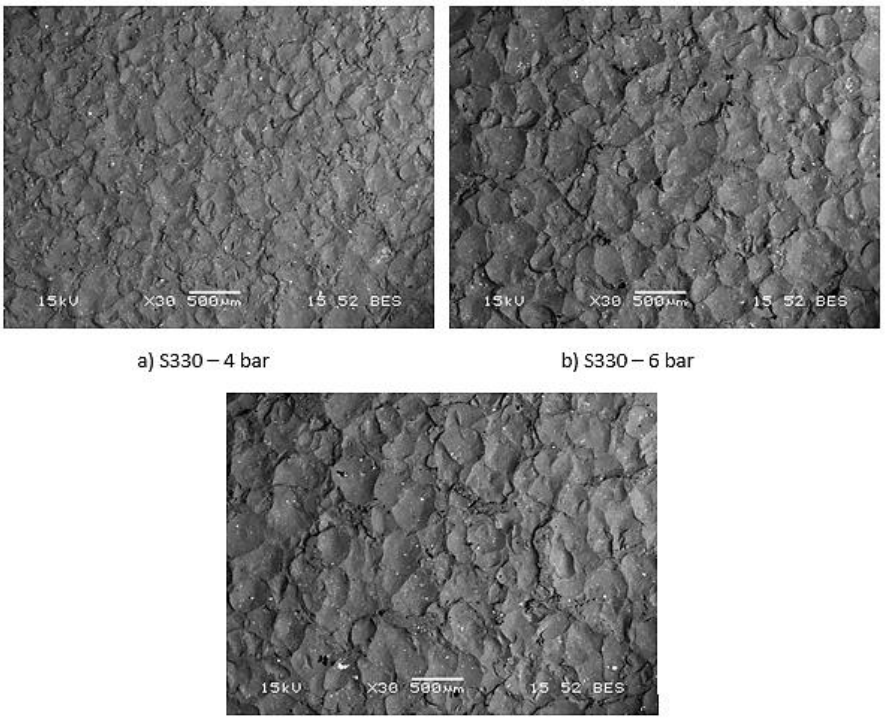


a) S230 - 4 bar

a) S230 - 6 bar

a) S230 - 8 bar

Şekil 4.23: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.60 mm).

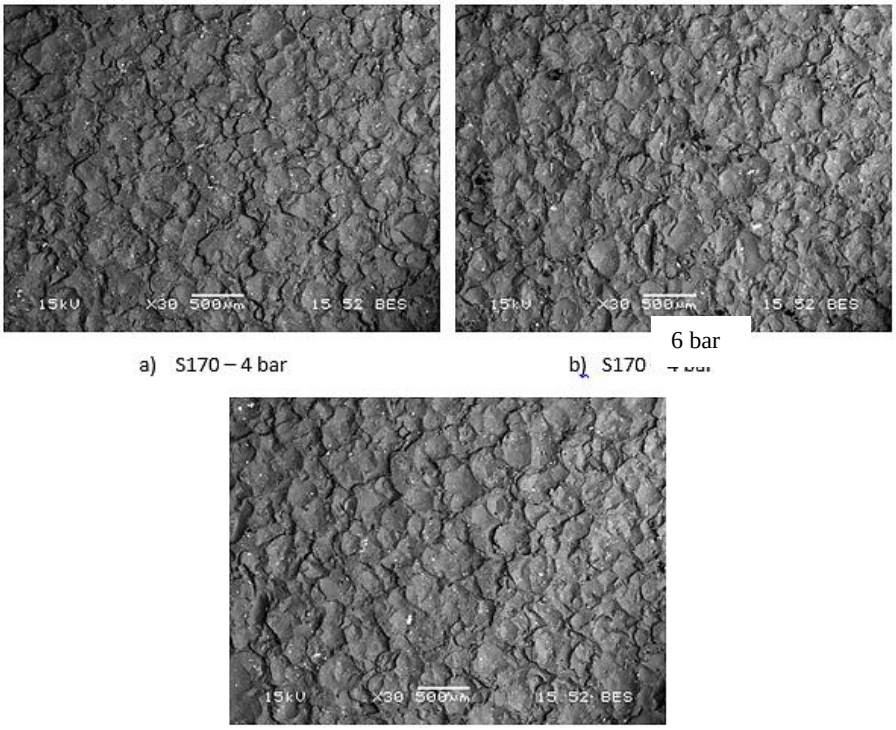


a) S330 – 4 bar

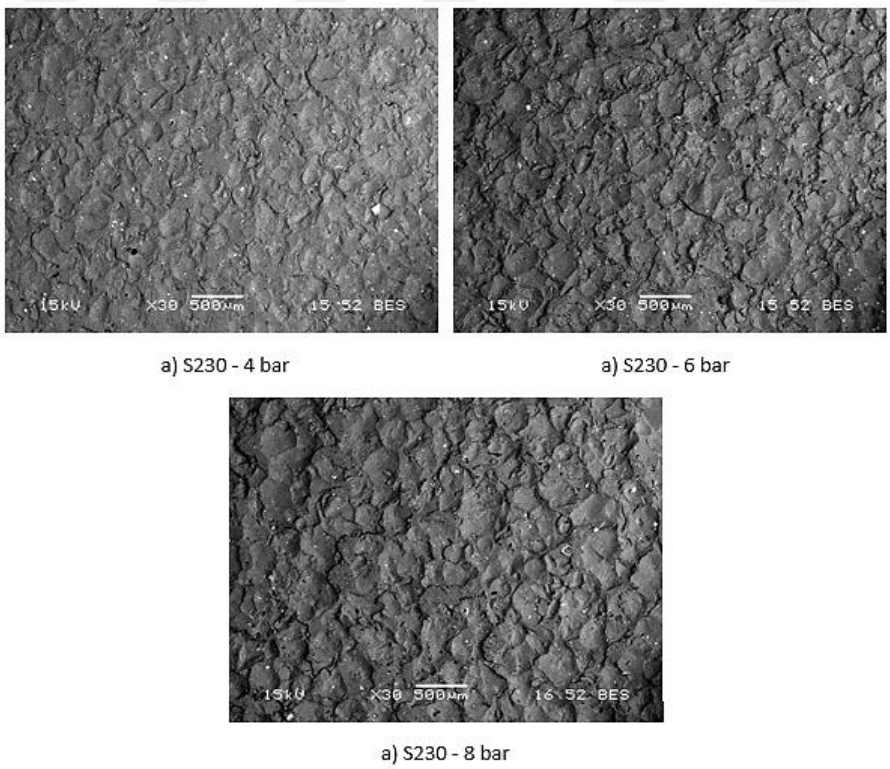
b) S330 – 6 bar

c) S330 – 8 bar

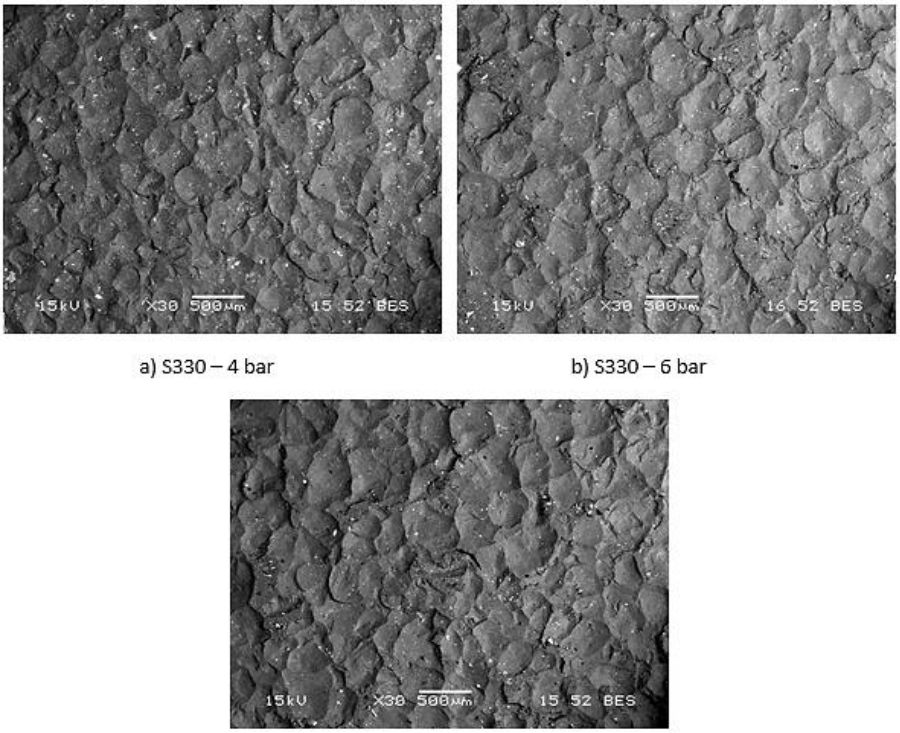
Şekil 4.24: AA6061 T6, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm).



Şekil 4.25: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm).



Şekil 4.26: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.6 mm).

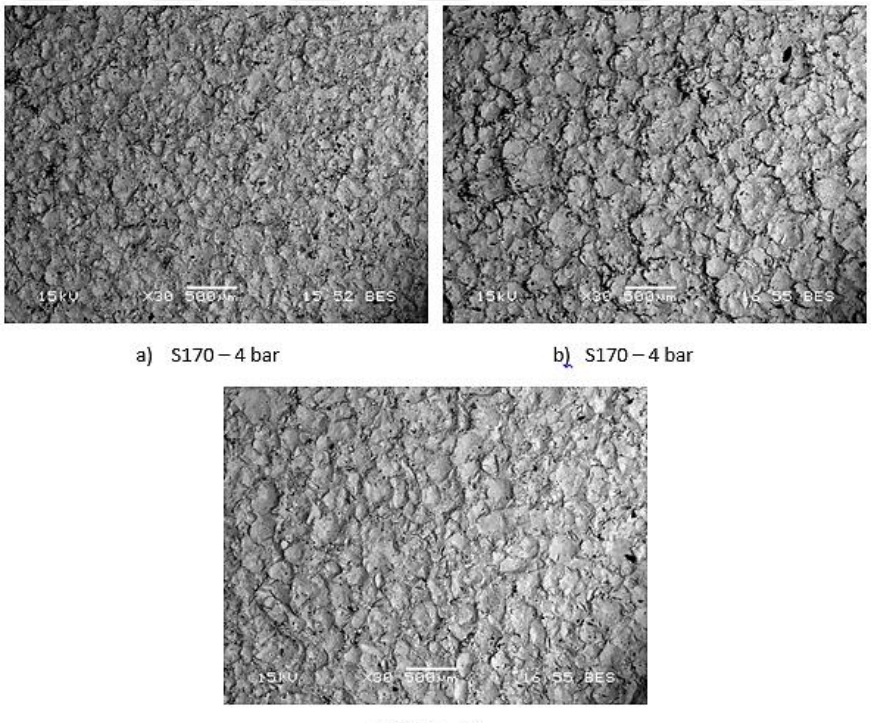


a) S330 – 4 bar

b) S330 – 6 bar

C) S330 – 8 bar

Şekil 4.27: AA5754 H111, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm).

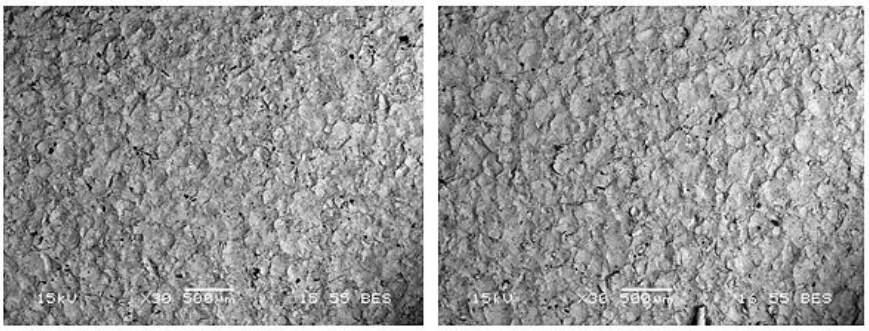


a) S170 – 4 bar

b) S170 – 4 bar

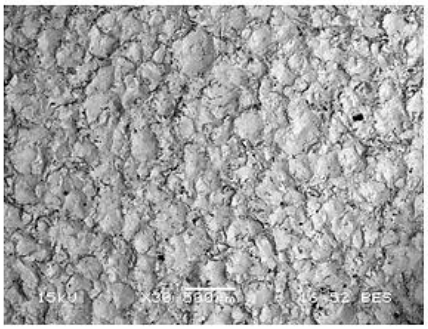
c) S170 – 8 bar

Şekil 4.28: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S170 (0.42 mm).



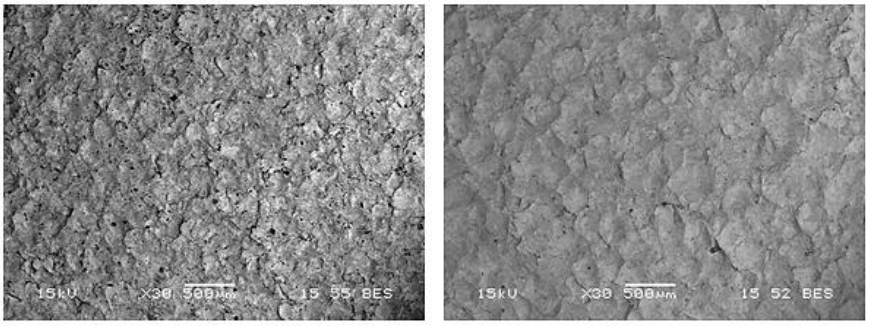
a) S230 - 4 bar

a) S230 - 6 bar



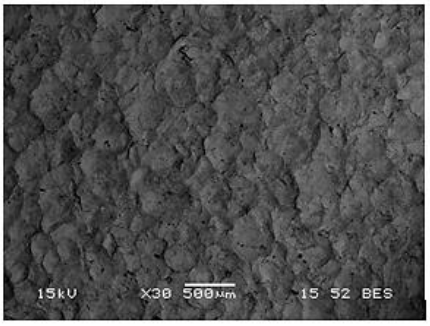
c) S230 - 8 bar

Şekil 4.29: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S230 (0.60 mm).



a) S330 – 4 bar

b) S330 – 6 bar



b) S330 – 8 bar

Şekil 4.30: S235JR, bilyeli dövme parametrelerinin SEM analizi:S330 (0.84 mm).

SEM görüntüleri incelendiğinde, S170 bilyede basınç arttıkça yüzeyde oluşan tepe-çukur oluşumları giderek belirgin hale gelmiştir. Aynı yorumu S230 ve S330 bilyeler için yapmak mümkündür. SEM görüntüleriyle yüzey pürüzlülük değerleri birbirini desteklemektedir.

Bilyeli dövmede aynı basınç değerlerinde S330 (0.84mm) bilyelerin S230 (0.6mm) ve S170(0.42mm) bilyelere göre belirgin deformasyon bölgeleri oluşturmuştur. Bilye çapı arttıkça tepe-çukur oluşumlarının arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum pürüzlülükle de örtüşmektedir.

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Bilyeli dövme yöntemi ile AA6061 T6, AA5754 H111 alüminyum alaşımlarına ve S235JR çeliğine, S170, S230 ve S330 bilyelerle 4, 6 ve 8 bar püskürtme basınçlarında dövme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda genel sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir. Ayrıca maddeler halinde verilmiştir.

Tablo 5.1: Bilyeli dövme işlemi genel sonuçları.

Numune	Bilye Türü	Basınç (bar)	Yüz. Ört. Oranı (%)	Çekme Day. (MPa)	Uzama (%)	Mikrosertlik $HV_{0.5}$ (Dövülmüş yüzey)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Darbe Day. (kj/m^2)
AA6061 T6	Dövülmemiş	--	--	315.8	16.8	86	0.11	218,8
	S170	4	100	317.3	16.0	96.5	2.3	216,1
	S170	6	100	318.6	15.0	101.25	3.02	215,7
	S170	8	100	316.6	13.2	106,1	4	213,3
	S230	4	100	318.8	16.6	104.25	3.01	211,0
	S230	6	100	319.9	16.2	107.5	3.23	206,2
	S230	8	100	327.8	15.0	117.15	4,92	183,0
	S330	4	100	319.1	15.4	120.25	3.51	212,1
	S330	6	100	324.4	14.3	123.6	5.13	207,8
	S330	8	100	323.0	14.3	126	5.17	169,6
AA5754 H111	Dövülmemiş	--	--	206	24,7	75	0.27	619,6
	S170	4	100	207,2	24	83	2.3	587,5
	S170	6	100	209,5	21,8	89	2.6	550,0
	S170	8	100	213,8	19,8	96.5	3.6	533,3
	S230	4	100	213,5	20,8	87.65	3.7	558,3
	S230	6	100	215	19,8	98.3	3.46	537,5
	S230	8	100	221,8	18	105	3.68	494,2
	S330	4	100	215,2	20,2	97.5	3.64	542,5
	S330	6	100	216,6	18,2	100.3	5.42	472,9
	S330	8	100	214,5	18,4	111.5	5.62	417,9

Tablo 5.2 (devamı) : Bilyeli dövme işlemi genel sonuçları.

Numune	Bilye Türü	Basınç (bar)	Yüz. Ört. Oranı (%)	Çekme Day. (MPa)	Uzama (%)	Mikrosertlik $HV_{0.5}$ (Dövülmüş yüzey)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Darbe Day. (kj/m^2)
S235JR	Dövülmemiş	--	--	302,8	44,2	167	1.17	1666,7
	S170	4	100	315,0	42	170.65	2.26	1500,0
	S170	6	100	317,8	41,8	186	2.58	1416,7
	S170	8	100	327,4	41,5	191.5	3.04	1333,3
	S230	4	100	318,0	41,4	177.5	3.68	1500,0
	S230	6	100	321,7	41	186.5	3.6	1375,0
	S230	8	100	327,7	38,8	199	3.74	1250,0
	S330	4	100	315,56	39	199.3	3.38	1458,3
	S330	6	100	325,1	38,6	210	4.09	1416,7
	S330	8	100	330,04	36,8	212.5	4.75	1166,7

- Bilye çapı arttıkça numunelerde çekme mukavemetinde artış, % uzama değerlerinde ise düşme gözlemlenmiştir.
- AA6061 T6 alüminyum alaşımında püskürtme basıncının artması ile çekme dayanımında küçük bilye çapında (S170/ 0.4mm) %3'e; büyük bilye çapında (S330/0.84mm) ise % 2.72'ye varan artışlar tespit edilmiştir. Çekme dayanımının dövülmemiş numuneye göre en yüksek olduğu değerler; düşük bilye çapında %100 yüzey örtme oranında 8 bar basınçtaki dövme işleminde %3.80; küçük bilye çapında %200 yüzey örtme oranında 6 bar basınçtaki dövme işleminde %3.86 artış gerçekleşmiştir. Dövme işleminin etkisiyle %100 yüzey örtme oranı ile tüm parametrelerde çekme dayanımında %1 ile %3.8 arasında artış tespit edilmiştir. Büyük bilye çapında ve yüksek püskürtme basıncında (8bar) çekme dayanımında bir miktar düşme kaydedilmiştir. Bunun muhtemel sebebinin malzeme yüzeyinde mikro çatlakların olabileceğidir.
- AA5754 H111 alüminyum alaşımında S230 bilye çapında ve yüksek püskürtme basıncında %7.67 ile en yüksek çekme dayanımı tespit edilmiştir. Örtücülük oranı arttıkça çekme dayanımı da artmaktadır.
- S235JR çelik malzemede en yüksek çekme dayanımı %8.98 ile yüksek basınçta (8 bar) ve yüksek bilye çapında (S330) gerçekleşmiştir.

- Mikro sertlikler incelendiğinde basıncın ve bilye çapının artışı ile bütün numunelerde sertliklerin artış gösterdiği ve sertliğin yüzeyden merkeze doğru azaldığı belirlenmiştir. Dövülmemiş numuneye göre en yüksek sertlik artış oranı 8 bar basınçta %46.51 ile AA6061 T6 malzemede gözlenirken, en düşük sertlik artışı 4 bar basınçta S235JR malzemede gözlenmiştir.
- Çentikli darbe deneyleri sonucunda numunelerin kırılma enerjilerinde püskürtme basıncının ve bilye çapının artışı ile düşme tespit edilmiştir. Buna neden olarak bilyeli dövme işlemi sonunda numunelerin tümünde çekme dayanımındaki artış ile beraber yüzeyde gevrekliğinde artmış olması gösterilebilir.
- Yüzey örtme oranının artması (%100'den %200'e) ile farklı bilye çaplarında yapılan dövme işlemi çekme dayanımını ve mikro sertliği arttırmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü ise azaltmıştır. AA6061 T6 alüminyum alaşımında, püskürtme basıncı 6 bar basınçta gerçekleştirilen deneylerde küçük bilye çapında (S230/ 0.6mm) yüzey örtücülük oranı %100'den %200'e çıkartıldığında çekme dayanımı %2.3, dövülmemiş malzemeye göre ise %3.86 artış göstermiştir. Büyük bilye çapında (S330/0.84mm) çekme dayanımı yüzey örtme oranı %200'e çıkartıldığında %0.7; dövülmemiş malzemeye göre %3.39 artış tespit edilmiştir. Büyük bilye çapındaki dayanımdaki artış daha az gerçekleşmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü üç bilye çapında da basıncın artması ile artış göstermiştir. AA6061 T6 alüminyum alaşımında, düşük bilye çapında basıncın iki kat arttırılması (4 bar'dan 8 bar'a) ile yüzey pürüzlülüğündeki artış %63.8 olurken, büyük bilye çapında bu artış % 47.3 olarak tespit edilmiştir. AA5754 H111 alüminyum alaşımında S330 bilyede basınç 4 bar'dan 6 bar'a çıkarıldığında %22.50 artış gerçekleşirken basınç 4 bar'dan 8 bar'a yükseltildiğinde pürüzlülük değeri %47.29 oranında artış göstermiştir.

- Numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde bilye çapı arttıkça plastik deformasyon ve tepe-çukur oluşumunun artışı gözlenmiştir. Püskürtme basıncı arttıkça yüzeyde oluşan tepe-çukur oluşumları daha belirgin hale gelmiştir. Örtücülük oranı arttıkça numune yüzeyinde sertliğin artması ve pürüzlülüğün düşmesi ile daha düzgün bir yapı gözlenmektedir. Bu daha önce yapılmış literatür çalışmalarıyla uyum göstermiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada iki alüminyum alaşımı ve bir çelik malzemeye üç farklı bilye çapında ve üç farklı püskürtme basıncında bilyeli dövme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve yüzey özelliklerinin ne oranda değiştiği deneysel sonuçlar bölümünde tartışılmıştır. Alüminyum malzemeleri kullanım alanlarını arttırmayı planladığımız bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki çalışmalar incelenebilir.

- Bilyeli dövme işlemi sonrası kaynaklı birleştirrmelerde kaynak kabiliyeti üzerine çalışma yapılabilir.
- Bilyeli dövme işleminde farklı kalınlıklara sahip malzemelerin dövülmesi sırasında meydana gelebilecek deformasyon miktarı araştırılarak optimum püskürtme basıncı ve bilye çapları tespit edilebilir. Bu deformasyon miktarının oransal değeri belirlenerek tasarım çalışmalarında bu etki göz önüne alınabilir.
- Alüminyum alaşımı ve çelik numuneler ısıl işlemle sertleştirildikten sonra bilyeli dövme işlemi uygulanarak mekanik ve korozyon özellikleri incelenebilir.
- Alüminyum alaşımlarında çekme dayanımı arttırılan numunelere yorulma testi uygulanarak sürekli yorulma sınırı araştırılabilir.
- Bilyeli dövme işleminde farklı püskürtme açılarının malzemenin mekanik ve yüzey özelliklerine etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] R. Varol, *2024 aluminyum alaşımının yorulma ömrü üzerine farklı bilyeli dövme işlem parametrelerinin etkisi,* Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,1990.

[2] Z. Alkan, R. Varol and R. Server, "Bilyeli dövme uygulanmış AA1050 alüminyum malzemenin metalografik incelenmesi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* vol. 20, no. 5, pp. 524-529, 2016.

[3] E. Avcu, "Bilyalı dövme parametrelerinin AA7075 T6 alüminyum alaşımının yüzey altı özelliklerine etkileri," *GU J Sci, Part C,* vol. 6, no. 4, pp. 741-752, 2018.

[4] O. Ünal and R. Varol, "Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening," *Applied Surface Science,* no. 290, pp. 40-47, 2014.

[5] T. A. Başer, "Alüminyum Alaşımları Ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. Mühendis ve Makina," *Mühendis ve Makina,* vol. 53, no. 635, pp. 51-58, 2012.

[6] K. Coşkun, *Hadde Alüminyum Alaşımlarının Uçaklarda Kullanılması,* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.

[7] Shot Peening Applications, Metal Improvement Company, 2005.

[8] Y. Y. Avcu, *Ti6Al4V titanyum alaşımın bilyalı dövme sonrası aşınma davranışının incelenmesi,* Kocaeli: Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, 2019.

[9] B. Önen, Y. Yıldıran and A. Çınar, "Investigation of the Effects of Erosion Test Parameters on the Particle Impengement Velocity by Using CFD Analysis," *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress,* vol. 127, no. 4, pp. 1225-1229, 2015.

[10] A. Yalçınkaya, *Bilyalı dövme prosesi uygulanan tank palet pimlerinin yorulma analizi,* Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, 2019.

[11] [Online]. Available: https://www.wheelabratorgroup.com/en-in/my-application/application-by-industry /aerospace/landing-gear-preparation. [Accessed 05 Nisan 2021].

[12] Z. Alkan, *Alüminyum Alaşımlarında Bilyalı Dövmenin Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerine Etkisi,* Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2014.

[13] B. Chen, B. Huang, H. Liu, X. Li, M. Ni and C. Lu, "Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 6061 aluminum alloy," *J. Mater. Res.*, vol. 29, no. 24, pp. 3002-3010, 2014.

[14] S. Sathyajith and S. Kalainathan, "Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser," *Optics and Lasers in Engineering*, no. 50, pp. 345-348, 2012.

[15] R. Markovina, B. Blagojević and D. Ban, "Investigation Of Influential Parameters On Shot-Peening Of Alumınum Alloys," in *12th International Research/Expert Conference*, İstanbul, 2008.

[16] S. S. Patil, S. P. S. K. S. and S. A. S., "A Review on Influence of Various Technological Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloys," in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018.

[17] O. Hatamleh, R. S. Mishra and O. Oliveras, "Peening Effects on MechanicalProperties in Friction Stir Welded AA 2195 at Elevated and Cryogenic Temperatures," *Materials and Design*, vol. 30, no. 8, pp. 3165-3173, 2009.

[18] O. Ünal, *Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel olarak incelenmesi*, Bartın üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, 2011..

[19] İ. Ay and R. Sakin, "Kumlama ile parça temizleme ve bilyalı dövme prosesi," *Makina & Metal Teknolojisi*, pp. 68-72, 1988.

[20] [Online]. Available: https://www.bdmbilginogludokum.com.tr/urunler/celik-granul-bilya.png. [Accessed 8 nisan 2021].

[21] N. Bek, "Peening Uygulamaları," *Yüzey İşlem Kumlama Dergisi,* no. 7, pp. 26-28, 2009.

[22] E. Harbelioğlu, *Bilyalı dövmenin AA7075-T6 alaşımının yüzey özelliklerine ve erozif aşınma davranışına etkisi,* Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 2018.

[23] V. B. Nguyen, H. J. Poh and Y.-W. Zhang, "Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations," *Powder Technology*, no. 256, pp. 100-112, 2014.

[24] R. Varol, 2004.

[25] "Fetaş Metalurji," 5 Mayıs 2021. [Online]. Available: https://www.fetasmetalurji.com.