



**ÇEKME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ OLAN
YİVLİ-SETLİ NAMLULARDA ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN KALINTI GERİLMEMEYE
VE İSABET DAĞILIMINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet MEYDAN

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇEKME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ OLAN
YİVLİ-SETLİ NAMLULARDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
KALINTI GERİLMEMEYE VE İSABET DAĞILIMINA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ahmet MEYDAN

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet MEYDAN tarafından hazırlanan “Çekme Yöntemi ile Üretilmiş Olan Yivli-Setli Namlularda Üretim Parametrelerinin Kalıntı Gerilmeye ve İsabet Dağılımına Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Başkan : Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
24/06/2025 tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı **beyan ederim.**

24/06/2025

İmza

Ahmet MEYDAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇEKME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ OLAN YİVLİ-SETLİ NAMLULARDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN KALINTI GERİLMEME VE İSABET DAĞILIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet MEYDAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışmada, button rifling (çekme yöntemi) ile üretilen yivli-setli tüfek namlularında, üretim parametrelerinin kalıntı gerilme dağılımı ve isabet hassasiyeti üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Altı farklı üretim parametresine sahip namlu kullanılarak yapılan çalışmada, raybalama işlemi sırasında uygulanan kesme hızı (23–30 m/dk), ilerleme hızı (0,08–0,10 mm/dev) ve yiv-set çekme hızı (762–1270 mm/dk) sistematik olarak değiştirilmiştir. Bu değişkenlerin, namlu iç yüzey pürüzlülüğü (R_a), XRD ile belirlenen kalıntı gerilme dağılımı ve 105 metre mesafede ölçülen atış gruplaması (MOA) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ilerleme hızı (0,09 mm/dev) ile işlenen namlular, ortalama $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü ve atışların ortalamasında 1,073 MOA değerine ulaşarak en iyi isabet performansını göstermiştir. Benzer şekilde, orta düzeyde kesme hızı (27 m/dk) ile üretilen namluların dağılım ortalaması $\text{MOA} \approx 1,371$ değeriyle yüksek performans sergilemiştir. Buna karşın, yüksek yiv-set çekme hızı (1270 mm/dk) uygulanan namluda, yüzey altı çekme gerilmeleri artmış ve MOA değeri 1,162'den 1,206 seviyesine yükselmiştir. Özellikle, 0° yönünde düşük kalıntı gerilme düzeyine sahip namluların, ortalama %20 daha düşük MOA ile daha kararlı atış gruplamaları sunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, üretimden kaynaklanan kalıntı gerilmelerin yönelimi ile atış isabeti arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, yivli-setli namlu üretiminde proses-parametre-performans ilişkisini deneysel temellere dayandırarak literatüre önemli katkı

sunmakta; aynı zamanda yüksek hassasiyetli, yerli üretim silahlar için savunma sanayine doğrudan teknik rehberlik sağlamaktadır.

2025, xi + 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Namlu üretimi, Kalıntı gerilme, Yiv-Set, Raybalama, Derin delik delme.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MANUFACTURING PARAMETERS ON THE RESIDUAL STRESS AND ACCURACY DISTRIBUTION IN RIFLE BARRELS MANUFACTURED BY THE BUTTON RIFLING

Ahmet MEYDAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

In this research, the effects of manufacturing parameters on residual stress distribution and accuracy performance were experimentally investigated in rifle barrels manufactured using the button rifling method. The study was conducted using barrels produced with six different sets of parameters, where the cutting speed (23–30 m/min), feed rate (0,08–0,10 mm/rev), and button pull speed (762–1270 mm/min) applied during the reaming process were systematically varied. The effects of these variables on internal barrel surface roughness (R_a), residual stress distribution determined via XRD, and shot grouping (MOA) measured at a distance of 105 meters were analyzed. According to the results, barrels processed with a feed rate of 0,09 mm/rev exhibited the best accuracy performance, achieving an average surface roughness of $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ and an average shot grouping of 1,073 MOA. Similarly, barrels produced with a moderate cutting speed (27 m/min) showed high performance with a grouping average of approximately $\text{MOA} \approx 1,371$. In contrast, the barrel subjected to a high button pull speed (1270 mm/min) exhibited increased subsurface tensile residual stresses and a rise in MOA value from 1,162 to 1,206. Notably, barrels with lower residual stress levels in the 0° direction provided more stable shot groupings, with an average of 20% lower MOA. These findings demonstrate a strong correlation between the orientation of residual stresses induced during manufacturing and shooting accuracy. This study contributes significantly to the literature by establishing an experimental basis for the process–parameter–performance

relationship in rifled barrel manufacturing and provides direct technical guidance for the defense industry in producing high-precision, domestically manufactured firearms.

2025, xi + 56 pages

Keywords: Barrel manufacturing, Residual stress, rifling, reaming, Deep hole drilling.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılardan dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ 'a, araştırmama koşulsuz destek veren Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifi Yönetim Kurulu Başkanı Naci TANIK 'a, Başkan Yardımcısı Ali KARAKEDİK 'e, Huğlu Savunma A.Ş. Genel Müdürü Abdussamed GÜZEL 'e ,değerli ekip arkadaşlarım Makine Yüksek Mühendisi Orhan KOÇ' a ve Makine Mühendisi Ömer KIZILKAYA 'ya ve tüm Huğlu Savunma A.Ş ailesine teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte göstermiş olduğu sabır, anlayış ve sürekli desteğiyle yanımda olan Makine Mühendisi değerli eşim Asiye MEYDAN 'a teşekkür ederim.

Ahmet MEYDAN
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımı	1
1.2 Amaç ve Kapsam	1
1.3 Tezin Yapısı	2
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	4
2.1 Ateşli Silahların Tarihçesi	4
2.1.1 Tabanca	5
2.1.2 Makineli Tabanca.....	5
2.1.3 Taarruz Tüfekleri	6
2.1.4 Keskin Nişancı Tüfekleri	8
2.2 Namlu Üretim Yöntemleri	9
2.2.1 Tek Noktadan Kesme Yöntemi.....	10
2.2.2 Broş Yöntemi	11
2.2.3 Soğuk Dövme Yöntemi.....	12
2.2.4 Elektrokimyasal Yöntemi	14
2.2.5 Çekme Yöntemi ile Namlu Üretimi	15
2.3 Kalıntı Gerilmeler ve Etkileri	16
2.4 İsabet Kabiliyeti ve Dağılımın Kavramı	17
2.5 Raybalama ve Yiv-Set İşlemlerinin Etkileri.....	19
2.6 Namlu Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	20
3. MATERYAL ve METOT	23
3.1 Deney Düzenegi ve Malzemeler	23

3.2 Raybalama İşlemi Parametreleri	25
3.2.1 Rayba ve Rayba Çapı Seçimi	27
3.3 Yiv-Set Çekme İşlemi.....	28
3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri	28
3.5 Numunelerin Kalıntı Gerilme Analizi	29
3.6 Dağılım Testleri	31
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	32
4.1 Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri.....	32
4.2 Dağılım ve Raybalama Sonrası Namlu İçi Yüzey Pürüzlülük Sonuçları	33
4.3 Raybalama Parametrelerinin Etkisi	38
4.4 Yiv-Set Açma İşleminin Etkisi	43
4.5 Kalıntı Gerilmelerin İsabet Dağılımına Etkisi	45
4.6 Hedeflenen İsabet Kabiliyetine Ulaşma Durumu	48
5. SONUÇ.....	49
5.1 Sonuçlar	49
5.2 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar	50
6. KAYNAKÇA	51
ÖZGEÇMİŞ.....	56

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

C	Karbon
Cr	Krom
E	Elastisite Modülü
GPa	Gigapaskal
HRc	Rockwell Sertlik (C Ölçeği)
J	Joule
m/dk	Metre/Dakika
m/s	Metre/Saniye
mm/dk	Milimetre/Dakika
mm/dev	Milimetre/Devir
Mo	Molibden
MPa	Megapaskal
Mn	Mangan
P	Fosfor
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
S	Kükürt
Si	Silisyum
ν	Poisson Oranı
μm	Mikrometre
σ_y	90° yönündeki kalıntı gerilme
σ_x	0° yönündeki kalıntı gerilme
σ_{xy}	45° yönündeki kalıntı gerilme

Kısaltmalar

CNC	Computer Numerical Control
ECM	Electrochemical Machining
FMJ	Full Metal Jacket
MKE	Makine ve Kimya Endüstrisi
MOA	Minute Of Angel
MP 18	Maschinenpistole 18
MPT-76	Milli Piyade Tüfeği
NATO	North Atlantic Treaty Organization
StG 44	Sturmgewehr 44
XRD	X-Ray Diffraction

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İlk gerçek ateşli silah el topu	4
Şekil 2.2 Whellock tabancası	5
Şekil 2.3 Canik marka modern tabanca	5
Şekil 2.4 MP 18 hafif makineli tabanca	6
Şekil 2.5 Huğlu marka Mohaç makineli tabancası	6
Şekil 2.6 StG 44 taarruz tüfeği	7
Şekil 2.7 Türk silahlı kuvvetleri tarafından kullanılan MPT-76 piyade tüfeği	7
Şekil 2.8 Whitworth rifle tüfeği	8
Şekil 2.9 Huğlu Ovis-G2 uzun menzilli keskin nişancı tüfeği	9
Şekil 2.10 Yiv-Setli namlu görseli	10
Şekil 2.11 Tek noktadan kesme takımı	10
Şekil 2.12 Tek noktadan kesme işlemi	11
Şekil 2.13 a) Yiv-set broş takımı b) Broş takımı yiv açma işlemi gösterimi	11
Şekil 2.14 Broş ile yiv-set açma makinesi	12
Şekil 2.15 Dövme işleminin izometrik açıdan gösterimi	13
Şekil 2.16 Dövme işleminin yandan gösterimi	13
Şekil 2.17 Dövme namlu takımı	13
Şekil 2.18 Dövme işlemi öncesi ve sonrası	14
Şekil 2.19 a) Namlu üretimi için tasarlanan elektrokimyasal işleme tezgâhı, b) Aynı anda birden fazla namlunun tezgâhta işlenmesi, c) Elektrokimyasal işleme takımının şematik ifadesi, d) Namlu örneği	15
Şekil 2.20 Çekme yöntemiyle namlu üretiminde kullanılan takımlar ve işleme adımları	16
Şekil 2.21 Kalıntı gerilme oluşumunu etkileyen temel faktörler	17
Şekil 2.22 Sabit mesafede yapılan çoklu atışların hedef üzerindeki dağılımı	18
Şekil 2.23 MOA'nın mesafeye göre lineer genişlemesi	19
Şekil 3.1 Sabit atış sehpa düzeneğinin şematik görünümü ve atış testlerinde kullanılan silah	23
Şekil 3.2 MOA değerinin matematiksel hesabı	25

Şekil 3.3	100 yard mesafede MOA gösterimi.	25
Şekil 3.4	Namlu 2-2'nin yüzey pürüzlülüğü ölçümü.	29
Şekil 3.5	Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan XRD cihazı ve namlu aparatı.	30
Şekil 3.6	105 metre mesafeye yapılan atışın hedef görüntüsü ve MOA analizi (Ballistic-X uygulaması ile elde edilmiştir).	31
Şekil 4.1	Farklı kesme hızı parametrelerinin mikroyapı görüntüleri.	32
Şekil 4.2	Farklı ilerleme hızı parametrelerinin mikroyapı görüntüleri.	33
Şekil 4.3	Kesme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.	36
Şekil 4.4	İlerleme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.	36
Şekil 4.5	Yiv-set çekme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.	36
Şekil 4.6	Namlu 1'in 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.	39
Şekil 4.7	Namlu 2'nin 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.	40
Şekil 4.8	Namlu 3'ün 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.	41
Şekil 4.9	Namlu 4'ün 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.	42
Şekil 4.10	Namlu 5'in 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.	43
Şekil 4.11	Namlu 6'nın 0µm -25µm -50µm Derinlikteki Kalıntı Gerilmelerinin Değişimi.	44
Şekil 4.12	Namluların 0° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.	45
Şekil 4.13	Namluların 45° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.	46
Şekil 4.14	Namluların 90° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Namlu malzemesi kimyasal bileşenleri.	21
Çizelge 2.2	Namlu malzemesi mekanik özellikleri.	21
Çizelge 3.1	Namlu üretim parametresi farkları.....	24
Çizelge 3.2	Namlu üretim parametreleri.....	26
Çizelge 4.1	Namluların dağılım test değerleri çizelgesi.	34
Çizelge 4.2	Namlu yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri çizelgesi.	35



1. GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Dünya genelinde yivli setli ve uzun namlulu silah gruplarında hem askeri hem de sivil kullanıcılar açısından silahın her koşulda güvenilir şekilde çalışması büyük önem taşımaktadır. Ancak bu güvenilirlik, tek başına yeterli değildir ayrıca silahın isabet hassasiyeti ve atış performansı da kritik değerlendirme kriterlerindendir.

Silahların atış hassasiyetini belirleyen temel ölçütlerden biri, dağılım değeri olarak bilinen MOA (Minute of Angle)'dır. MOA değeri, silahın belirli bir mesafedeki atışlarının birbirine ne kadar yakın düştüğünü ifade eden açısal bir ölçüdür. Kullanım amacına göre kabul edilebilir MOA değeri değişiklik gösterebilir. Örneğin, bir keskin nişancı tüfeği için 1 MOA'lık bir dağılım yüksek kabul edilirken, bir taarruz tüfeği için bu değer operasyonel açıdan yeterli görülebilir. Yüksek hassasiyetli keskin nişancı tüfekleri genellikle 0,5 MOA veya altını hedeflerken; yivli av tüfeklerinde bu değer çoğunlukla 1 MOA'nın altında garanti edilmektedir.

MOA değerinin düşürülmesi, yalnızca mühimmat kalitesiyle değil, aynı zamanda namlu üretim süreçleri, kullanılan malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri ile kalıntı gerilmeler gibi birçok üretim parametresiyle doğrudan ilişkilidir. Üretimde tercih edilen talaşlı imalat yöntemleri, uygulanan ısı işlemler ve malzeme içindeki iç gerilmeler, namlunun titreşim davranışını etkileyerek atış sırasında meydana gelen sapmaları artırabilir veya azaltabilir. Bu nedenle yüksek hassasiyetli silah üretiminde, üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve kalıntı gerilmelerin kontrol altına alınması, hedeflenen MOA seviyesine ulaşabilmek açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın temel amacı, namlu üretiminde uygulanan raybalama parametreleri ile yiv-set çekme hızının, silahın isabet hassasiyeti üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu doğrultuda toplam altı adet namlu üretilmiş; bu namluların beşinde raybalama işlemi

sırasında kullanılan parametreler değiştirilmiş, birinde ise yiv-set çekme işleminin hızı farklılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında, üretim sürecinde yapılan bu değişikliklerin, namlu iç yüzey kalitesi, kalıntı gerilmeler ve dağılım performansı (MOA değeri) üzerindeki etkileri detaylı şekilde değerlendirilecektir. Özellikle üretimden kaynaklanan kalıntı gerilmelerin, atış hassasiyetiyle olan ilişkisi hem deneysel testler hem de sayısal analizler yoluyla ortaya konulacaktır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, yüksek hassasiyetli namlu üretimi için optimum üretim parametreleri belirlenecek ve MOA değerinin iyileştirilmesine yönelik teknik öneriler sunulacaktır.

1.3 Tezin Yapısı

Birinci bölüm (Giriş), çalışmanın amacı, kapsamı ve problem tanımını içermektedir. Ayrıca, araştırmanın hedefleri ve genel çerçevesi açıklanmakta, tezin yapısına dair genel bir bilgi verilmektedir.

İkinci bölüm (Literatür İncelemesi), konuya ilişkin daha önce yapılmış çalışmaları içermekte ve namlu üretim yöntemleri, kalıntı gerilmelerin etkileri, isabet kabiliyeti ve dağılım kavramı gibi temel başlıkları ele almaktadır. Bu bölümde ayrıca raybalama ve yiv-set işlemlerine ilişkin mevcut literatür değerlendirilmektedir.

Üçüncü bölüm (Materyal ve Metot), çalışmada kullanılan malzemeler ile deney düzeneğini detaylı biçimde açıklamaktadır. Raybalama parametreleri, yiv-set çekme işlemi, yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemleri ve dağılım testleri bu bölümde teknik yönleriyle ele alınmaktadır.

Dördüncü bölüm (Bulgular ve Tartışma), deneysel çalışmalardan elde edilen verileri sunmakta ve bu bulguları değerlendirmektedir. Raybalama parametrelerinin ve yiv-set işleminin kalıntı gerilmeler ve isabet dağılımı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde tartışılmaktadır.

Beşinci bölüm (Sonuç), çalışmadan elde edilen genel sonuçları özetlemekte ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunmaktadır.

Altıncı bölüm (Kaynakça), tez boyunca yararlanılan tüm akademik kaynakları sıralamaktadır.



2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Ateşli Silahların Tarihçesi

Silahların kökeni, insanların savaş ve yiyecek ihtiyaçlarını avcılık aracıyla karşılayabilmeleri için taş ve kemik gibi malzemelerden yapılmış ilkel aletleri kullanmasına kadar uzanmaktadır. Ateşli silahların ortaya çıkışı ise doğrudan barutun bulunmasıyla ilişkilidir. Çinliler, 9. yüzyılda barutu keşfetmiş ve bu keşfi 10. yüzyılda basit el topu benzeri silahlarda kullanmaya başlamışlardır. Bu bağlamda, ilk gerçek ateşli silah olarak kabul edilen "el topu" (Şekil 2.1) (hand cannon), 13. yüzyılın sonları ile 14. yüzyılın başları arasında geliştirilmiştir (Peterson 1961).



Şekil 2.1 İlk gerçek ateşli silah el topu (Vikipedi 2025).

Barutun icadı 9. yüzyılda Çin’de gerçekleşti. Çinli simyacılar, ölümsüzlük iksiri bulma amacıyla çeşitli kimyasalları karıştırırken, potasyum nitrat, kükürt ve kömürden oluşan karışımın patlayıcı özelliğini fark ettiler ardından 10. ve 11. yüzyıllarda bu karışım, askeri amaçlarla kullanılmaya başlandı ve "ateş mızrakları" (fire lance) olarak bilinen ilkel silahlarda kullanıldı (Kelly 2004).

Uzun mesafeli atıcılık ise ateşli silahların gelişmesiyle birlikte 15. ve 16. yüzyıllarda yaygınlaşmaya başladı. Özellikle yivli namluların 16. yüzyılda geliştirilmesiyle silahların menzili ve hedefi vurma isabet oranı arttı. İlk keskin nişancılar, 18. yüzyılda Amerikan Bağımsızlık Savaşı ve Napolyon Savaşları sırasında görülmeye başlandı. Modern anlamda keskin nişancılık ise I. Dünya Savaşı'nda gelişti ve eğitilen keskin nişancılar, düşman birliklerine uzun mesafeden hassas atışlar yapmaya başladı (Pegler 2011).

2.1.1 Tabanca

15. yüzyılın sonları ile 16. yüzyılın başlarında, Almanya ve İtalya'da (wheellock) (Şekil 2.2) geliştirilmiştir. Bu sistemde, tetik çekildiğinde çelik bir çark dönerek barutu tutuşturmakta ve atışı gerçekleştirmektedir (Blackmore 1990). Wheellock'un icadı ile ateşli silahların daha güvenilir ve etkili hale gelmesini sağladı. Bu mekanizma, ilk başta tüfeklerin ve tabancaların ateşleme sisteminde önemli bir ilerleme olarak kabul edilse de zaman içerisinde daha pratik ve hızlı ateş imkânı sağlayan sistemlere (Şekil 2.3) bırakmıştır. Özellikle çarklı mekanizma, yapısı ve karmaşık işleyişinden dolayı hız, taşınabilirlik ve pratiklik isteyen savaş koşullarında bazı dezavantajlar doğurmuştur. Yine de bu buluş, ateşli silahların evrimindeki önemli bir kilometre taşıdır.



Şekil 2.2 Wheellock tabancası (Vikipedi 2025).



Şekil 2.3 Canik marka modern tabanca (Ege Gündem 2025).

2.1.2 Makineli Tabanca

MP 18, Theodor Bergmann tarafından tasarlanan ve üretilen ilk hafif makineli tabanca (Şekil 2.4) olarak bilinmektedir. Bu silah, hafif makineli silah kategorisinin tarihsel başlangıç noktasıdır. İlk kez I. Dünya Savaşı'nda, Almanya'nın saldırı timleri tarafından

kullanılmıştır (Blackmore 1990). Bu dönemde savaşın uzun süren siper savaşlarıyla geçen aşamalarında, askerlerin hareket kabiliyeti ve ateş gücü daha fazla ön plana çıkmıştır. MP 18 kısa namlusu, taşınabilirliği ve yüksek ateş etme hızıyla, piyadelerin daha dinamik şekilde hareket etmelerine yardımcı olmuştur. Theodor'un bu tasarımı sonraki yıllarda hafif makineli tüfeklerin evriminde önemli bir referans olmuştur (Guillou 2018).

Saldırı timlerinin, hendeklerde veya dar alanda çatışmalarında MP 18 ile hızlı ve yoğun ateş açabilmesi, düşman üzerinde önemli bir etki bırakmıştır. Özellikle yüksek atış hızı ve etkili ateş gücü bu silahı müttefik kuvvetler üzerinde psikolojik ve taktiksel anlamda oldukça etkili bir hâle getirmiştir (Chase 2003).



Şekil 2.4 MP 18 hafif makineli tabanca (Wikipedi 2025).

Günümüzde Türkiye'de de bazı savunma sanayi firmaları, farklı çalışma prensiplerine sahip modern makineli tabancalar (Şekil 2.5) üretmektedir. Bu üretimler hem iç güvenlik birimleri hem de ihracat odaklı olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.5 Huğlu marka Mohaç makineli tabancası (Huğlu 2025).

2.1.3 Taarruz Tüfekleri

Taarruz tüfekleri, tam otomatik veya yarı otomatik ateş edebilen orta kalibre mühimmat kullanan ve hafif yapıları sayesinde piyade silahı olarak tasarlanan tüfeklerdir. Bu

silahların temel amacı ise askerlerin hem kısa hem de orta menzilli çatışmalarda etkinliklerini artırmak, daha hızlı ve etkili bir şekilde hedefe müdahale etmelerini sağlamaktır. Taarruz tüfeklerinin daha önce kullanılan ağır piyade tüfeklerine göre çok daha taşınabilir ve hızlı ateş edebilen yapıları bu silahları modern savaşlarda vazgeçilmez kılmaktadır.

Tarihteki ilk gerçek taarruz tüfeği ise Almanya tarafından II. Dünya Savaşı sırasında geliştirilen Sturmgewehr 44 (StG 44) (Şekil 2.6) modelidir (Vikipedi 2024).



Şekil 2.6 StG 44 taarruz tüfeği (Vikipedi 2025).

Türkiye’de de piyade tüfeği olarak üretilen modeller bulunmaktadır. En bilinen ve hâlen Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde aktif olarak kullanılan model, MPT-76 'dır. MKE tarafından üretilen bu silah, 7,62x51 mm NATO mühimmatı kullanmakta ve hem dayanıklılığı hem de yüksek isabet oranıyla öne çıkmaktadır. MPT-76 (Şekil 2.7), zorlu arazi ve iklim koşullarında yapılan testlerden başarıyla geçmiş, bu nedenle kolluk kuvvetleri ve askeri birlikler tarafından güvenle tercih edilmektedir. Ayrıca, bu silah Türkiye'nin savunma sanayisinde yerli ve milli üretim kapasitesinin geldiği noktayı göstermesi açısından da büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.7 Türk silahlı kuvvetleri tarafından kullanılan MPT-76 piyade tüfeği (Milliyet 2016).

2.1.4 Keskin Nişancı Tüfekleri

Keskin nişancı tüfekleri, uzun menzilli ve yüksek hassasiyetli atışlar için tasarlanmış silahlardır. Bu silahlar optik nişangâhlarla birlikte kullanılır ve amacı hedefe tek atışta isabet sağlamaktır. Tarihteki ilk keskin nişancı tüfeği olarak kabul edilen 1857 yılında İngiltere'de Joseph Whitworth tarafından geliştirilen Whitworth Rifle'dır. Whitworth Rifle (Şekil 2.8) Amerika İç Savaşı sırasında Konfederasyon birlikleri tarafından kullanılmış ve 800–1000 metreye kadar etkili atış yapabilmesi ile dikkat çekmiştir. Bu nedenle, ilk kez uzun mesafeli hassas atışlar yapmak için özel olarak kullanılan bir tüfek olarak tarihe geçmiş ve modern keskin nişancı tüfeklerinin öncüsü sayılmıştır (Pegler 2011).



Şekil 2.8 Whitworth rifle tüfeği (Frankonia 2025).

Günümüzde kullanım açısından modernleşmiş ve namlu ile mühimmat üretim teknolojisinin gelişmesi sayesinde 1500–2000 metreye kadar hassas atış yapabilen keskin nişancı tüfekleri üretilmektedir. Bu modern tüfekler, gelişmiş optik sistemler, yüksek kaliteli namlular ve özel mühimmatlar sayesinde uzun mesafelerde dahi yüksek isabet oranı sağlamaktadır.

Türkiye’de de son yıllarda yerli keskin nişancı tüfekleri üretiminde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Birçok yerli firma, uluslararası standartlara uygun, uzun menzilli ve yüksek hassasiyetli keskin nişancı tüfekleri geliştirmektedir.

Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifi, av tüfeği üretiminde edindiği tecrübesini, savunma sanayii alanına da taşıyarak Ovis-G2 (Şekil 2.9) modeli ile keskin nişancı tüfeği üretimine adım atmıştır. Yerli üretim olan Ovis-G2, Türkiye'nin savunma sanayiindeki millileşme hamlesinin önemli bir örneği olarak öne çıkmaktadır.

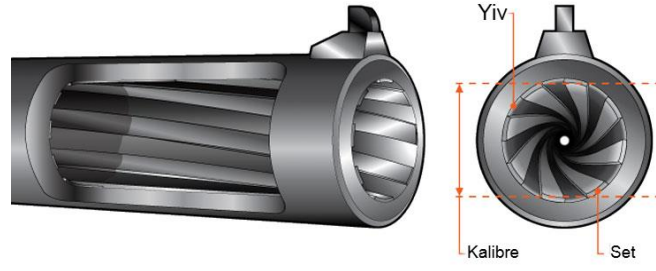


Şekil 2.9 Huğlu Ovis-G2 uzun menzilli keskin nişancı tüfeği (Huğlu 2025).

2.2 Namlu Üretim Yöntemleri

Silah üretim teknolojisinin evrimi tarih boyunca hem savaş stratejilerini hem de endüstriyel üretim tekniklerini etkilemiştir. Bu teknolojinin merkezinde yer alan namlu ise bir silahın atış doğruluğunu, menzilini ve genel performansını doğrudan etkileyen en kritik bileşenlerden biridir. İlk namlular 14. yüzyılda Çin'de döküm yöntemiyle bronzdan üretilmiş olup silindirik yapıda ve iç yüzeyleri düz olacak şekilde tasarlanmıştır (Vikipedi t.y.). Avrupa'da ise 16. yüzyıldan itibaren dövme ve delme gibi yöntemlerle namlu üretimi yapılmaya başlanmıştır. O dönemde namlular demir çubukların dövülerek şekillendirilmesi, ardından bu çubukların birleştirilip içlerinin delinmesiyle elde edilmiştir (Walter 2006).

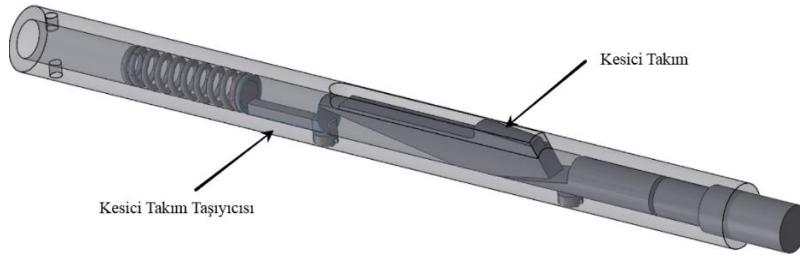
Günümüzde ise namlu üretimi, yüksek hassasiyetli CNC tezgâhları, özel kesme takımları ve bilgisayar destekli tasarım sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Modern üretim yöntemleri arasında tek noktadan kesme, broşlama, soğuk dövme ve elektrokimyasal işleme gibi teknikler yer almakta olup, her biri farklı hassasiyet ve maliyet avantajları sunmaktadır. Bu yöntemler sayesinde mikrometre düzeyinde toleranslarla üretim yapılabilmekte ve bu hassasiyet silahın isabetliliğini ve kullanım ömrünü doğrudan artırmaktadır. Özellikle askeri ve sportif amaçlarla kullanılan silahlarda, namlu iç yüzeyinin düzgünlüğü, yiv-set (Şekil 2.10) yapısının formu ve kalan gerilmelerin dağılımı gibi detaylar kritik öneme sahiptir. Bu nedenle namlu üretiminde kullanılan yöntemler, malzemeler ve süreç parametreleri performans üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 2.10 Yiv-Setli namlu görseli (Grey Ops 2010).

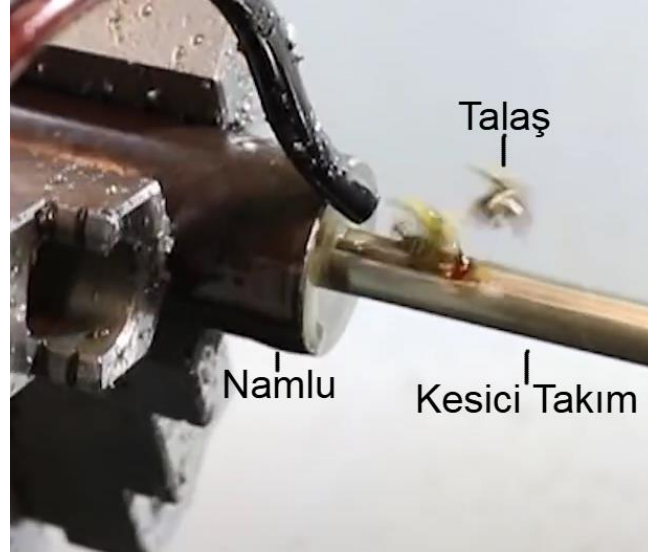
2.2.1 Tek Noktadan Kesme Yöntemi

Tek noktadan kesme yöntemi, namlu iç yüzeyinde yiv ve setlerin oluşturulmasında kullanılan en eski ve hassas tekniklerden biridir. Bu yöntemde, kesici takım (Şekil 2.11) yalnızca tek bir yiv oluşturacak şekilde çalışır ve her pasoda belirli bir derinlikte talaş kaldırılarak istenilen profil kademeli olarak elde edilir. Yiv sayısı kadar tekrar edilen bu işlem genellikle CNC kontrollü torna veya özel olarak tasarlanmış tek nokta kesme tezgâhlarında gerçekleştirilir (Vortakt Barrel Works t.y.). Bu yöntemin en önemli avantajı, yüksek hassasiyetli yiv geometrisinin elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Ayrıca takımın malzeme ile temas süresinin kısa olması kesici takımın ömrünü uzatmakta ve yüzey kalitesini artırmaktadır.



Şekil 2.11 Tek noktadan kesme takımı.

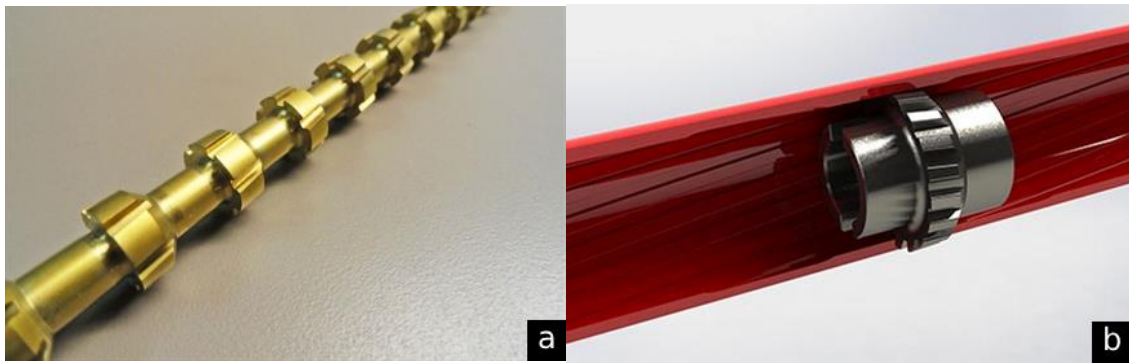
Ancak, tek noktadan kesme işlemi (Şekil 2.12) işlem süresinin uzun olması nedeniyle seri üretime uygun değildir. Daha çok yüksek hassasiyet gerektiren askeri veya özel amaçlı nişancı silahlarında tercih edilmektedir. Bu yöntemde oluşan yiv ve set profilleri merminin namludan çıkarken daha stabil bir dönme hareketi kazanmasını sağlamak ve dolayısıyla atış isabetliliğini artırmaktadır. Yöntemin hassasiyet avantajı özellikle kalıntı gerilmelerin minimumda tutulmasını sağlayarak namlu ömrü ve performansını olumlu yönde etkilemektedir (Liu ve Fan 2009).



Şekil 2.12 Tek noktadan kesme işlemi (Kibler's Longrifles 2021).

2.2.2 Broş Yöntemi

Broş yöntemi, hassasiyet ve tekrarlanabilirlik gerektiren namlu iç yüzey işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir talaş kaldırma yöntemidir. Bu yöntemde, "broş" (Şekil 2.13) adı verilen kesici ağızlı özel bir takım namlu boyunca çekilerek yiv ve set profili tek seferde işlenerek elde edilir. Her bir kesici ağız bir öncekinden biraz daha fazla talaş kaldıracak şekilde sıralanmıştır. Bu yapı sayesinde işlem hem hızlı hem de hassas bir şekilde tamamlanabilir (Kalpakjian ve Schmid 2014). Özellikle seri üretime uygun olması ve yiv geometrisinde yüksek tekrar edebilirlik sunmasıyla dikkat çeker. Ancak broş takımının yüksek maliyeti ve takımın kırılma durumundaki risk bu yöntemin esnekliğini sınırlar.



Şekil 2.13 a) Yiv-set broş takımı (Sniper's Hide 2020), b) Broş takımı yiv açma işlemi gösterimi (Matwest UK Ltd t.y.).

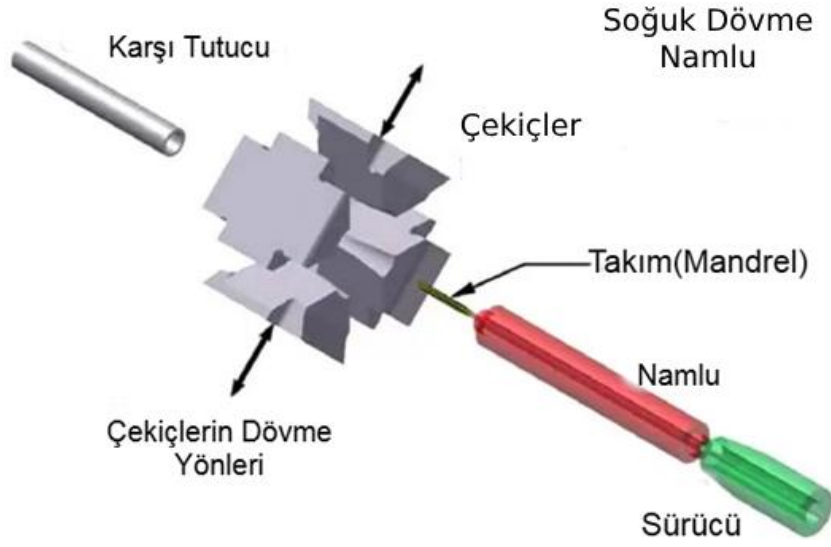
Günümüzde birçok üretici otomatik broş makineleri kullanarak büyük miktarda namlu üretimini kısa sürede gerçekleştirebilmektedir. Yöntemin avantajları içinde yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, işlem süresinin az olması ve talaş kaldırabilme kapasitesinin fazla olması yer alır (Groover 2010). Ayrıca, işlem sırasında malzeme üzerinde daha az kalıntı gerilme olduğu için dayanıklılık ve isabet kabiliyeti açısından da olumlu etkiler sunmaktadır (LaBounty 2012). Avantajlarından bir diğeri ise tek noktadan kesme yönteminde olduğu gibi gerilim giderme işlemine gerek duyulmaz. Dezavantajları ise takım maliyetlerinin yüksek olduğu ve ayrıca takım üzerindeki keskin köşelerde küçük kırıklar oluşup tığın yapısının bozulmasıdır. Takımın kırılğan olması nedeniyle malzemenin sabitlenmesinin önemli olduğu ve tığ ile namlu arasında eksen kaçıklığı olması durumunda broş tığının kırılma riski yüksektir.



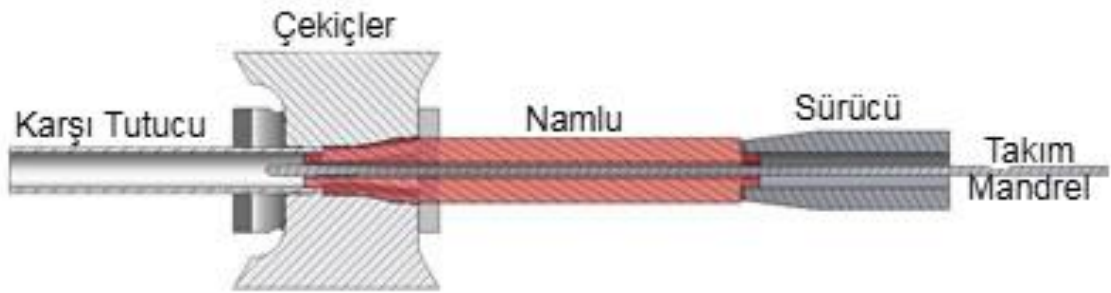
Şekil 2.14 Broş ile yiv-set açma makinesi (Absolute Machine Tools t.y.).

2.2.3 Soğuk Dövme Yöntemi

Soğuk dövme yöntemi, modern namlu üretiminde hem dayanıklılık hem de üretim verimliliği açısından yaygın olarak tercih edilen bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, namlu içinde oluşacak olan yiv-setin karşılığı olan takım (Şekil 2.17) namlu içine yerleştirilir ve namlu içinden geçirilerek sürücü yardımı ile çekiçlere doğru yönlendirilir (Şekil 2.16) ardından dışarıdan çekiç darbeleriyle şekillendirilir (Şekil 2.18). Dövme işlemi sırasında (Şekil 2.15) namlu hem istenilen çap ve boyuta ulaşır, aynı zamanda iç yüzeyinde yiv ve setler plastik deformasyon yoluyla oluşturulur. Bu teknik sayesinde, namlu içinde yüksek ölçü hassasiyeti, yüzey kalitesi ve artan malzeme yoğunluğu elde edilir. Ayrıca işlem sırasında malzemenin tane yapısı sıkıştığı için, soğuk dövme ile üretilen namlular daha uzun ömürlü ve mukavemetli olur.



Şekil 2.15 Dövme işleminin izometrik açıdan gösterimi (de Rosset 2015).



Şekil 2.16 Dövme işleminin yandan gösterimi (Bear Creek Arsenal 2022).

Soğuk dövme yöntemi özellikle askeri ve yarı otomatik silah üreticileri tarafından tercih edilmektedir. Çünkü hem üretim süresi kısadır hem de yiv-set işlemi ve fişek yatağı tek işlemde bitirilir. Bununla birlikte yöntem yüksek yatırım maliyeti ve karmaşık kalıp tasarımları gerektirdiğinden küçük ölçekli üreticiler için sınırlayıcı olabilir (Kalpakjian ve Schmid 2014). Ayrıca, bu teknikle üretilen namlularda iç kalıntı gerilmeler oluşabileceği için hassas atış performansı beklenen namlularda gerilim giderme işlemi uygulanması gereklidir (Xu ve Zhang 2022).



Şekil 2.17 Dövme namlu takımı (National Institute of Justice t.y).



Şekil 2.18 Dövme işlemi öncesi ve sonrası (CZ-USA 2023).

2.2.4 Elektrokimyasal Yöntemi

Elektrokimyasal işleme, namlu iç yüzeyinde yiv ve setlerin oluşturulmasında kullanılan ve malzeme aşındırma esasına dayalı temassız, yüksek hassasiyetli bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, anot “+” olarak işlev gören iş parçası (namlu), özel bir elektrolit sıvısı içerisinde katot “-” görevi gören takım elektrotla karşılıklı konumlandırılır (Şekil 2.19). Elektrot ile iş parçası arasında bir doğru akım uygulanarak, elektrolit aracılığıyla metal iyonları iş parçasından uzaklaştırılır ve istenilen geometri elde edilir (McGeough 1974). ECM yöntemi, özellikle sert ve işlenmesi zor olan malzemelerde, takım aşınması olmaksızın hassas işlemeye olanak tanır. Ayrıca termal deformasyon oluşmadığı için iş parçasında kalıntı gerilme bırakmaz ve gerilim giderme işlemine gerek duyulmaz (Rajurkar vd. 2013).

Namlu üretiminde ECM yöntemi, son yıllarda gelişen savunma sanayii ve uzay teknolojilerinde öne çıkmaktadır. Yöntemin en büyük avantajları arasında mikron düzeyinde hassasiyet karmaşık geometrilerin işlenebilmesi ve talaşsız bir işlem olması yer alır. Bununla birlikte, sistem kurulum maliyeti ve özel elektrolitlerin kullanımı nedeniyle yaygın endüstriyel kullanımı hâlâ sınırlıdır (Ghosh ve Mallik 2010). Yine de yüksek hassasiyetli, düşük deformasyonlu ve uzun ömürlü namlu üretimi için ECM, gelecek vaat eden yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. İşlem süresi uzundur fakat 4 veya 8 adet namluyu aynı anda işleme aldığı için maliyeti düşürür.



Şekil 2.19 a) Namlu üretimi için tasarlanan elektrokimyasal işleme tezgâhı, b) Aynı anda birden fazla namlunun tezgâhta işlenmesi, c) Elektrokimyasal işleme takımının şematik ifadesi, d) Namlu örneği (Emag 2025).

2.2.5 Çekme Yöntemi ile Namlu Üretimi

Çekme yöntemi olarak da adlandırılan button rifling, modern namlu üretiminde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde namlunun iç çapından biraz daha büyük ve yiv-set formuna sahip olan "button" isimli sert metal takım namlu boyunca takım üzerindeki hatve ile aynı oranda döndürülerek ve aynı anda çekilerek ilerletilir. Bu işlem sırasında takımın yüzeyinde bulunan yiv ve set profili soğuk şekillendirme ile namlu iç yüzeyine aktarılır. Bu sayede malzeme kesilmeden yer değiştirir yani talaş kaldırılmamış olur (Bolton-King 2017).

Çekme yöntemi genel olarak derin delme, raybalama, honlama ve ardından yiv-set açma (Şekil 2.20) adımlarını içerir. Soğuk şekillendirme ile yiv-set açıldığı için işlem sonrasında oluşan iç gerilimlerin malzemenin performansını olumsuz etkilememesi için gerilim giderme ısıtıl işlemi uygulanması gerekir (Ghosh ve Mallik 2010).

Yöntemin başlıca avantajları arasında düşük yatırım ve takım maliyeti, kısa işlem süresi ve yüksek geometrik hassasiyet yer alır. Bu avantajlar sayesinde özellikle çok sayıda üretim yapan firmalar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir (Absolute Machine t.y.). Ancak yöntemin her yiv profilinde esneklik sunmaması ve her profil için özel takım gerektirmesi, dezavantajları arasında sayılabilir.



Şekil 2.20 Çekme yöntemiyle namlu üretiminde kullanılan takımlar ve işleme adımları (Unisig 2022).

2.3 Kalıntı Gerilmeler ve Etkileri

Kalıntı gerilmeler, üretim süreçleri sırasında malzeme içerisinde oluşan ve dış yük olmaksızın içsel olarak var olan gerilimlerdir. Bu gerilmeler üretim, ısıtılma işlem veya yüzey modifikasyonları gibi işlemler sırasında termal farklılıklar, plastik deformasyonlar ve faz dönüşümleri gibi nedenlerle ortaya çıkar. Hacim değişimlerinin malzeme içinde eşit olmayan genişlemeyle birleşmesi sonucu iç gerilmeler meydana gelir (Mishra ve Mahoney 2007). Şekil 2.21’te görüldüğü üzere kalıntı gerilme oluşumu malzeme faktörü, üretim parametreleri ve termal faktörler gibi üç ana faktöre bağlıdır.

Bu faktörlerin her biri üretim sürecinde malzeme içinde farklı seviyelerde gerilme birikimine yol açabilir. Örneğin, namlu üretim sürecinde özellikle çekme ve dövme

yöntemindeki üretim aşamalarda parçanın uzunlamasına yapısı ve yiv-set gibi karmaşık iç geometriler heterojen ısıtma ve soğuma koşulları yaratabilir. Bu durum, namlu boyunca bölgesel genleşme farklılıklarına neden olur ve kalıntı gerilmelerin birikmesine yol açar (Withers ve Bhadeshia 2001).



Şekil 2.21 Kalıntı gerilme oluşumunu etkileyen temel faktörler (Mishra vd. 2014).

Kalıntı gerilmelerinin namlu üretiminde özellikle performans ve dayanıklılık üzerinde önemli etkileri vardır. Bu gerilmeler atış sırasında namlunun iç yapısını etkileyebilir ve dolayısıyla hedefteki isabet oranında belirleyici bir rol oynar. Kalıntı gerilmelerin düzensiz bir şekilde dağılması namlu yüzeyinde veya iç yapısında mikro çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Bu durumda atış esnasında dağılım değerlerinin büyümesine yol açabilir. Ayrıca kalıntı gerilmelerinin namlu ömrüne olan etkisi de göz ardı edilemez. Yüksek gerilim seviyeleri özellikle yerel çatlakların oluşmasına ve zamanla bu çatlaklar büyüyerek malzemenin kopmasına yol açabilir. Bu tür çatlaklar namlunun dayanıklılığını olumsuz durumda etkiler ve namlunun ömrünü kısaltabilir. Namlunun iç yapısındaki kalıntı gerilmelerinin dağılımı çatlakların başlangıç noktasını ve büyüme hızını etkileyebilir.

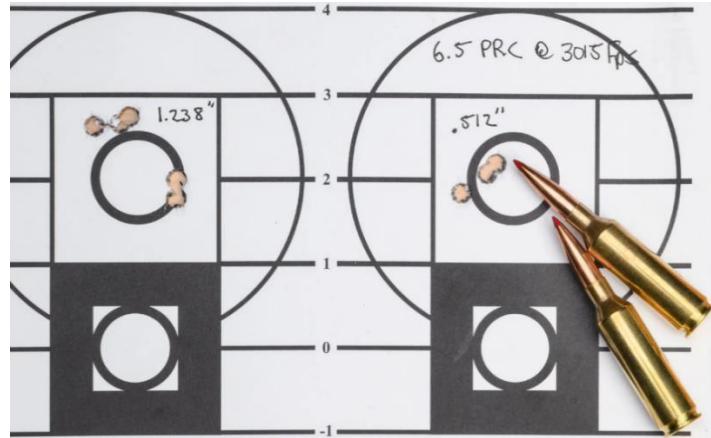
2.4 İsabet Kabiliyeti ve Dağılımın Kavramı

Namlu isabet kabiliyeti bir ateşli silahın belirli bir mesafede gerçekleştirilen tekrarlı atışlarda mermilerin hedefte ne kadar tutarlı bir şekilde birbirine yakın olduğunu ifade eder. Bu kavram, silahın sadece tek bir atışla hedefin merkezini vurabilme yeteneğinden ziyade, ardışık atışların oluşturduğu grup dağılımının dar olmasıdır. Dolayısıyla isabet

kabiliyeti atışların birbiriyle olan tutarlılığını ve silahın tekrarlanabilir performansını değerlendirir (Carlucci ve Jacobson 2018).

İsabet kabiliyeti namlunun geometrik hassasiyeti yiv ve set yapısı, yüzey kalitesi, malzeme içerisindeki kalıntı gerilmeler ve mermi ile namlu arasındaki teması gibi birçok parametreden etkilenir. Özellikle namlu iç yüzeyinde meydana gelebilecek mikroskobik bozulmalar veya üretim esnasında oluşan hatalar merminin dönme stabilitesini bozarak dağılım değerini artırabilir. Bununla birlikte atış esnasında oluşan dinamik etkiler (namlu salınımı veya hava koşullarına bağlı değişimler) de mermi çıkış yönünü etkileyerek isabet kabiliyetini düşürebilir. Bu nedenle yüksek isabet kabiliyeti sadece mühimmat kalitesiyle değil aynı zamanda namlunun üretim teknolojisi kullanılan malzemeye de doğrudan ilişkilidir.

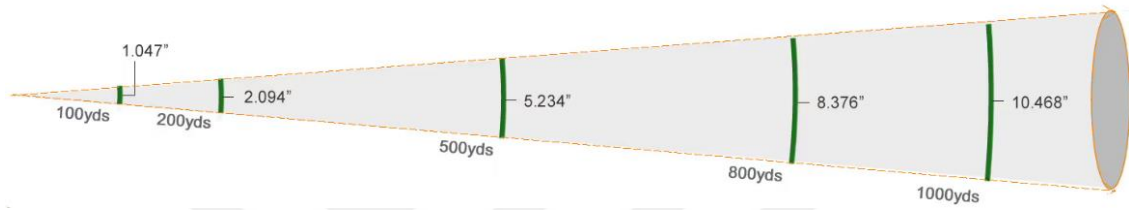
Ayrıca, üretim sırasında oluşan geometrik tolerans hataları ve kalıntı gerilmeler, atış sırasında namluda meydana gelen mikro düzeydeki sapmalara neden olarak dağılımı artırabilir. Bu durum mermilerin farklı çıkış açılarıyla hedefe ulaşmasına yol açar ve dolayısıyla dağılım değerini artırır. Dağılım, genellikle grup çapı grup merkezi etrafındaki sapmalar (Şekil 2.22) veya açısal ölçüler MOA ile ifade edilir (Carlucci ve Jacobson 2018).



Şekil 2.22 Sabit mesafede yapılan çoklu atışların hedef üzerindeki dağılımı (Snow 2020).

MOA bir dairenin 1/60 derecelik kısmını temsil eden açısal bir ölçü birimidir. Tüfekle atışlarda, hedef üzerindeki grup dağılımının değerlendirilmesinde sıklıkla

kullanılmaktadır. 1 MOA, 100 yard mesafede yaklaşık olarak 1,047 inçlik bir doğrusal mesafeye karşılık gelir. Bu nedenle, aynı açısal değer farklı mesafelerde daha geniş bir alana denk gelir. Şekil 2.23'te MOA'nın farklı mesafelerde hedef üzerinde oluşturduğu yayılma mesafeleri görselleştirilmiştir. 100 yadda 1,047", 200 yadda 2,094", 500 yadda 5,234", 800 yadda 8,376" ve 1000 yadda 10,468" olarak artan değerler, MOA'nın mesafe ile lineer olarak büyüdüğünü ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle hassasiyet gerektiren atış analizlerinde grupman boyutlarının değerlendirilmesinde büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.23 MOA'nın mesafeye göre lineer genişlemesi (Telluric Arms t.y.).

2.5 Raybalama ve Yiv-Set İşlemlerinin Etkileri

Modern silahların performansında namlu iç yüzey kalitesi önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle atış esnasında merminin izlediği yolu etkileyen faktörlerden birisi namlu yüzeyindeki pürüzlülük ve ölçüsel tutarlılıktır. Bu bağlamda hassas işleme tekniklerinden biri olan raybalama işlemi namlu iç yüzeyinin geometrik doğruluğunu ve yüzey kalitesini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Raybalama çoğu üretici firmanın talaş kaldırma işlemleri arasında son işlemi olarak uygulanır ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmakla birlikte namlu iç çapın istenilen toleranslara uygun hale getirilmesini sağlar (Kalpakjian ve Schmid 2014).

İyi uygulanmış bir raybalama işlemi çekirdeğin namlu içerisinde daha düzgün ve istikrarlı bir hareket yapmasını sağlayarak daha kararlı ve tekrarlanabilir atış sonuçları elde edilmesine yardımcı olur. Buna karşılık yetersiz veya hatalı uygulanmış bir raybalama işlemi namlu içinde çap değişimlerine, yüzeyde mikro çatlaklara veya sürtünmenin artmasına neden olabilir ve bu da mermi hareketinde sapmalara ve hedefte geniş bir dağılım değeri çıkmasına yol açar.

Tez kapsamında kullanılacak olan çekme yöntemi önceki bölümlerde detaylı şekilde açıklanmıştır. Bu yöntemde yiv ve setler talaş kaldırılmaksızın yüksek basınç altında plastik deformasyon yoluyla oluşturulmaktadır. Çekme işlemi sayesinde yüzey pürüzlülük değerleri düşük seviyelerde elde edilebilse de işlem sırasında oluşan kalıntı gerilmeler merminin namlu içindeki hareketini doğrudan etkileyebilir. Bu durum çekirdeğin dönme hareketinde dengesizliklere ve dolayısıyla atışlarda dağılımın artmasına neden olabilmektedir.

İşte bu noktada raybalama işlemi namlu iç yüzey kalitesini artırmak ve çekme işlemi sonrası oluşabilecek yüzey bozukluklarını gidermek amacıyla devreye girmektedir. Raybalama yüzey pürüzlülüğünü azaltarak merminin yiv-set içerisinde daha kararlı bir şekilde ilerlemesini sağlar (Kalpakjian ve Schmid 2014). Bu da atışların daha istikrarlı olmasına dolayısıyla hedefteki dağılımın düşük olmasına katkı sağlar. Ayrıca yüzey üzerindeki küçük bozulmaların giderilmesiyle birlikte sürtünme kuvvetleri azalır böylece hem mermi hızını optimize eder hem de namlu aşınmasını geciktirir.

Yani raybalama ve yiv-set işlemleri dağılımını iyileştiren kritik işlemlerdir. Raybalama çekirdeğin daha düzgün bir şekilde namlu içerisinde ilerlemesini sağlayarak atışların daha istikrarlı ve dar bir dağılımın içinde toplanmasına yardımcı olur. Yiv-set işlemi ise çekirdeğin daha stabil bir şekilde hedefe ulaşmasında rol oynar, çevresel faktörlerden daha az etkilenmesini sağlar ve atış doğruluğunu artırır. Her iki işlem de silahın performansını ve hedefe isabet oranını doğrudan etkileyerek daha etkili ve hassas atışlar yapılmasını sağlar.

2.6 Namlu Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Namlu üretiminde kullanılan çelik malzemeleri yüksek mukavemet, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi önemli özellikleri bulundurulmalıdır. Bu nedenle, namlu üretiminde tercih edilen çelik alaşımları genellikle yüksek mekanik özellikler ve iyi işlenebilirlik sunar. Tezde kullanacağımız 42CrMo4 çeliği, bu tür gereksinimlere uygun olan başlıca alaşımlardan biridir.

4140(42CrMo4) Çeliği düşük alaşımlı, orta karbonlu bir çeliktir ve namlu üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çelik, yüksek çekme dayanımı, sertlik ve yorulma direnci sunar (Kalpakjian ve Schmid 2014). Çizelge 2.1’de kullanılan namlu malzemesinin kimyasal bileşenleri ve Çizelge 2.2’de mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Namlu malzemesi kimyasal bileşenleri.

Element	% Ağırlık
C	0,4
Si	0,24
Mn	0,81
P	0,008
S	0,027
Cr	1,03
Mo	0,23

Çizelge 2.2 Namlu malzemesi mekanik özellikleri.

Özellikler	
Akma (MPa)	748
Çekme (MPa)	897
Uzama (%)	20,2
Kesit Daralması (%)	61,4
Sertlik (HRC)	29

4150 Çeliği, 4140 çeliğine benzer özellikler sunmakla birlikte, ek olarak daha yüksek sertlik seviyelerine ulaşabilir. Bu özellik özellikle askeri ve yüksek performanslı sivil silahlarının namlu üretiminde tercih edilmesini sağlar. Ancak yüksek sertlik nedeniyle işlenmesi daha zordur ve bu da üretim maliyetlerini artırabilir.

416R Paslanmaz Çelik, yüksek korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik özellikleri sunar. Bu nedenle özellikle denizcilik ve nemli ortamlarda kullanılan silahların namlu üretiminde tercih edilmektedir (Duan vd. 2019). Ancak, 4140 veya 4150 çeliklerine göre genellikle daha pahalıdır ve işlenmesi daha zordur.

CrMoV Çeliği, krom, molibden ve vanadyum alaşımlarına sahip bir çeliktir ve yüksek sıcaklık dayanımı ile bilinir. Bu özellik yüksek ateş hızına sahip silahların namlu üretiminde bu çeliğin tercih edilmesine neden olur (Demir ve Güner 2023). Ancak işlenmesi daha zor olan bu çelik üretim sürecini önemli ölçüde etkileyebilir.

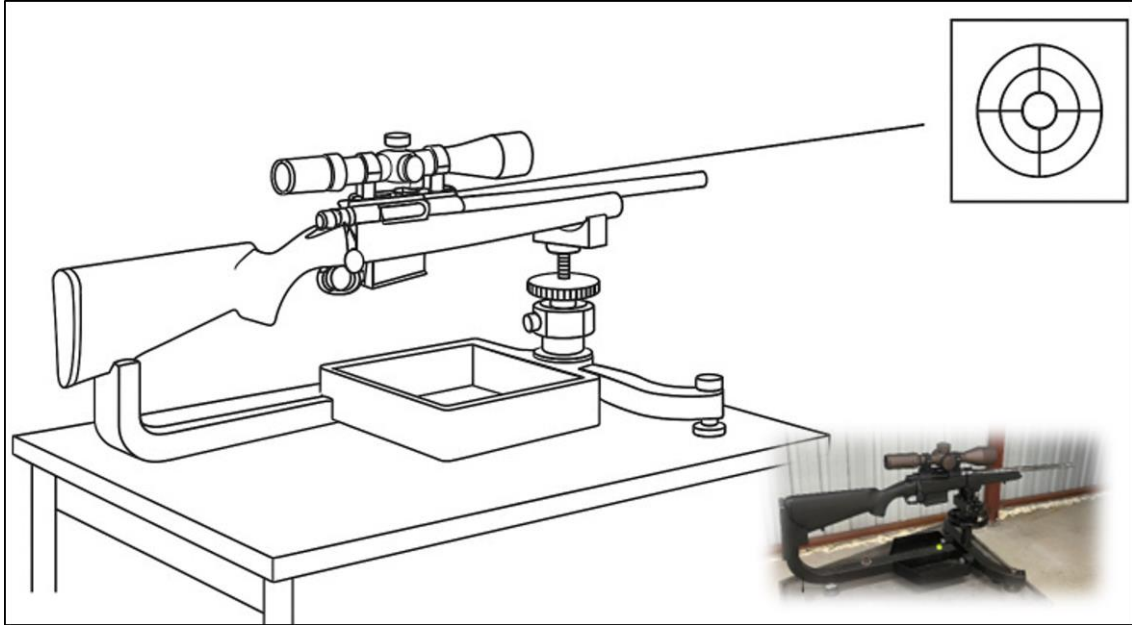
17-4 PH Paslanmaz Çelik, yüksek mukavemetli, korozyon direnci yüksek ve yüksek aşınma direnci olan bir çeliktir. Bu özellikler zor koşullarda çalışan namlular için 17-4 PH çeliğini ideal hale getirir. Ayrıca bu malzeme iyi işlenebilirlik ve yüksek sertlik değerleri sunar ve bu da onu silah endüstrisinde tercih edilen bir malzeme yapar (Hsieh, Wu ve Hung 2024).



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deney Düzeneği ve Malzemeler

Bu çalışmada, raybalama ve yiv-set çekme parametrelerinin atış hassasiyeti ve kalıntı gerilmelere etkisini incelemek amacıyla altı farklı konfigürasyonda namlu üretilmiştir. Her konfigürasyonda üretilen iki namludan biri atış testlerinde diğeri ise kalıntı gerilme analizlerinde kullanılmıştır. Deneysel düzenlemede yalnızca namlu değişken tutulmuş; silah platformu, kundak yapısı, montaj vidalarının tork değerleri ve yataklama koşulları sabit tutulmuştur. Bu yaklaşım ile dağılımı etkileyebilecek olan kaynaklar minimize edilerek namlu parametrelerindeki değişimin etkilerini izole etmeyi amaçlamaktadır. Atış testleri sabit sehpa düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Tüm testler aynı atıcı tarafından yapılmış, mühimmat olarak ise aynı üretim partisine ait boyutsal toleransları kontrol edilmiş Sellier & Bellot .308 Winchester (180 grain FMJ) fişekleri kullanılmıştır. Dağılım analizi her sette beş atış üzerinden yapılmış, en uç atışlar dışlanarak dört mermi ile MOA değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.1 Sabit atış sehpa düzeneğinin şematik görünümü ve atış testlerinde kullanılan silah

Çizelge 3.1’de, deneye tabi tutulan altı farklı namluya ait üretim parametreleri özetlenmiştir. Referans niteliğindeki Namlu 1, tüm parametrelerin sabit tutulduğu temel

konfigürasyon olup diğer namlular için karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmıştır. Namlu 2 ve Namlu 3 raybalama işleminde farklı kesme hızlarında işlenmiş; böylece bu parametrenin yüzey kalitesi ve dağılım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Benzer şekilde, Namlu 4 ve Namlu 5'te ilerleme hızı değiştirilerek bu değişkenin etkileri araştırılmıştır. Son olarak, Namlu 6'da yalnızca yiv-set çekme hızı değiştirilmiş olup, bu değişikliğin kalıntı gerilmeler ve atış hassasiyeti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Tüm namlular, derin delik delme çapı sabit tutularak aynı temel geometriyle üretilmiş; bu sayede parametre değişikliklerinin bağımsız etkilerinin analizi mümkün kılınmıştır.

Çizelge 3.1 Namlu üretim parametresi farkları.

Namlu No	Üretim amacı	Kesme Hızı(m/dk)	İlerleme Hızı(mm/dev)	Yiv-Set Çekme Hızı(mm/dk)
1	Referans namlu – tüm parametreler sabit	27	0,09	762
2	Düşük kesme hızı etkisi	23	0,09	762
3	Yüksek kesme hızı etkisi	30	0,09	762
4	Düşük ilerleme hızı	27	0,08	762
5	Yüksek ilerleme hızı	27	0,1	762
6	Artırılmış yiv-set çekme hızı	27	0,09	1270

Her namlu için dört set dağılım atışı yapılmıştır. Her sette hedefe beş mermi atılmış; dağılım analizi, en uç noktadaki atış hariç tutularak kalan dört atış üzerinden yapılmıştır ve dağılım değeri hesaplanmıştır. Tüm atışlarda, Sellier & Bellot markasına ait .308 Winchester mühimmat kullanılmıştır. Üretici verilerine göre bu mühimmatın namlu çıkış hızı 735 m/s ve çıkış enerjisi 3,160 J'dür. Mühimmatların tamamı aynı üretim partisine ait olup, tutarlılığı sağlamak amacıyla dijital kumpasla boyutsal ölçümleri yapılmış, yalnızca eş uzunlukta olan fişekler seçilerek kullanılmıştır. Bu şekilde, fişek yatağına oturma derinliği ve barut hacmi kaynaklı sapmaların etkisi azaltılmıştır.

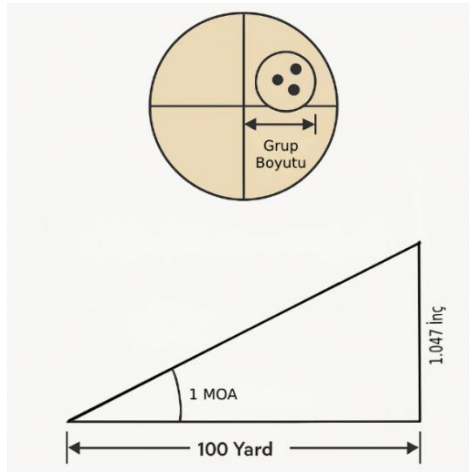
MOA (Minute of Angle), silahların isabet kabiliyetini ve atışların hedef üzerindeki dağılımını değerlendirmek amacıyla kullanılan açısal bir ölçü birimidir. Bir dairenin 1/60 derecesine karşılık gelen bu değer, özellikle uzun menzilli atışlarda mermilerin ne kadar

dar bir alana toplandığını ifade etmek için kullanılır. Pratikte 1 MOA, 100 yard (91,44 m) mesafede yaklaşık 1,047 inç (~26,6 mm) genişliğe karşılık gelir. Bu da bir silahın 100 yard mesafede (Şekil 3.3) yaptığı atışların 1 MOA'lık bir grup içinde toplandığı durumlarda, tüm mermi deliklerinin 26,6 mm çaplı bir dairenin içine düştüğü anlamına gelir. MOA değeri ne kadar küçükse, atışların hedef üzerinde o kadar dar bir alana toplandığı ve silahın isabet hassasiyetinin o kadar yüksek olduğu kabul edilir. MOA hesaplaması (Şekil 3.2) genellikle sabit bir mesafeden yapılan çoklu atışlar sonrasında, hedef üzerindeki en uzak iki mermi deliği arasındaki mesafe ölçülerek yapılır. Hesaplama şu formülle gerçekleştirilir:

$$MOA = \left(\frac{\text{Grup çapı (mm)}}{\text{Atış mesafesi (mm)}} \right) \times 3438$$

Şekil 3.2 MOA değerinin matematiksel hesabı.

Bu bağlamda MOA, namlu kalitesi, üretim süreci, mühimmat tutarlılığı ve montaj doğruluğu gibi birçok faktörün performansa etkisini nicel olarak ortaya koymak için kritik bir ölçümdür. Bu nedenle, silah tasarımı ve namlu üretimi süreçlerinde MOA analizleri, atış isabetinin objektif şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.



Şekil 3.3 100 yard mesafede MOA gösterimi.

3.2 Raybalama İşlemi Parametreleri

Bu çalışmada, raybalama işlemi sırasında kullanılan kesme ve ilerleme hızlarının namlu iç yüzey kalitesi, kalıntı gerilme dağılımı ve atış hassasiyeti üzerindeki etkilerini

değerlendirmek amacıyla çeşitli parametre (Şekil 3.2) kombinasyonları uygulanmıştır. Toplam altı farklı namlu üretilmiş; her biri yalnızca bir parametre değişkeni içerecek şekilde düzenlenmiştir. Bu yapı, parametrelerin etkilerinin birbirinden izole edilerek analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Namlu 1, referans olarak belirlenmiş olup, raybalama ve yiv-set çekme işlemleri sabit parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Bu namlu, diğer namlularla karşılaştırma amacıyla temel referans verisi sağlamaktadır. Namlular 2 ve 3, yalnızca raybalama işlemi sırasında uygulanan kesme hızının değiştirilmesiyle üretilmiştir. Bu iki namluda, ilerleme hızı ve yiv-set çekme hızı sabit tutulmuş, böylece kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Namlular 4 ve 5'te ise ilerleme hızı değiştirilmiş; kesme hızı ve yiv-set çekme hızı sabit bırakılmıştır. Bu parametre değişikliği sayesinde ilerleme hızının işlenmiş yüzey yapısı ve atış performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Namlu 6'da raybalama parametreleri (kesme ve ilerleme hızları) sabit tutulmuş, yalnızca yiv-set çekme hızı artırılmıştır. Bu sayede yiv-set işlemi sırasında uygulanan şekillendirme hızının, yüzey altı kalıntı gerilmelere ve dağılım karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir. Tüm raybalama işlemleri, derin delik delme sonrası Ø7,4 mm çapındaki deliklerin Ø7,62 mm hedef çapına hassas şekilde genişletilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan parametreler, üretici katalog değerleri ve literatür doğrultusunda seçilmiştir. Her namlu, tek değişken prensibi ile işlenmiş olup elde edilen yüzeyler daha sonraki analizlere temel oluşturacak şekilde standardize edilmiştir.

Çizelge 3.2 Namlu üretim parametreleri.

	Derin Delik Delme Çapı	Raybalama		Yiv-Set Çekme Hızı (mm/dk)
		Kesme Hızı(m/dk)	İlerleme Hızı(mm/dev)	
Namlu 1	Ø7,4	27	0,09	762
Namlu 2	Ø7,4	23	0,09	762
Namlu 3	Ø7,4	30	0,09	762
Namlu 4	Ø7,4	27	0,08	762
Namlu 5	Ø7,4	27	0,1	762
Namlu 6	Ø7,4	27	0,09	1270

Talaşlı imalat süreçlerinde kesme hızı ve ilerleme hızı, işleme kalitesi, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkili olan temel parametrelerdir. Kesme hızı (m/dk), takımın iş parçası yüzeyiyle temas eden noktasındaki çevresel hızını ifade ederken; ilerleme hızı (mm/dev), takımın her bir dönüşte iş parçası doğrultusunda kat ettiği mesafeyi belirtir. Genel olarak, yüksek kesme hızları daha kısa çevrim süreleri ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlasa da takım aşınma oranını artırabilir. Benzer şekilde, düşük ilerleme hızları daha iyi yüzey kalitesi sunarken üretim süresini uzatır. Bu iki parametrenin dengeli şekilde seçilmesi, optimum işleme performansı açısından kritik öneme sahiptir.

Namlu üretimi özelinde, iç yüzeyin geometrik hassasiyeti ve yüzey düzgünlüğü, merminin dönme kararlılığı ve dağılım performansı üzerinde belirleyici rol oynar. Bu bağlamda, raybalama işlemi sırasında uygulanan kesme ve ilerleme hızları yalnızca yüzey pürüzlülüğünü değil, aynı zamanda yüzey altı deformasyonlar ve kalıntı gerilmelerin oluşumunu da etkiler. Özellikle yiv-set işlemi öncesinde gerçekleştirilen bu işlemde oluşabilecek mikro çatlaklar veya malzeme düzensizlikleri, mermi çıkış stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu tez kapsamında uygulanan kesme ve ilerleme hızları, 42CrMo4 çeliği için önerilen değer aralıkları doğrultusunda belirlenmiş ve farklı kombinasyonlar hâlinde altı farklı namluya uygulanmıştır. Bu parametrelerin varyasyonu sayesinde, dağılım performansına olan etkileri deneysel olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

3.2.1 Rayba ve Rayba Çapı Seçimi

Raybalama işlemi, derin delik delme sonrasında namlu iç yüzeyinin çap hassasiyetini artırmak ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla uygulanır. Bu işlemde kullanılan rayba çapı, nihai iç çapın tolerans içinde kalmasını ve yiv-set işlemine uygun bir taban geometri elde edilmesini sağlar. Namlu iç çapı, fişeğin hazneye sorunsuz yerleşmesini ve merminin namluya merkezlenmiş biçimde girmesini doğrudan etkiler. Bu nedenle rayba çapı hem mekanik uyumu sağlamak hem de merminin dönme stabilitesini artırmak açısından kritik bir parametredir. Çapın çok dar olması fişeğin sıkı geçmesine, çok geniş olması ise merkezleme kayıplarına yol açarak dağılımın bozulmasına neden olabilir.

Bu çalışmada, tüm namlular için derin delik delme işlemi $\varnothing 7,4$ mm çapında gerçekleştirilmiş; raybalama işlemi ile çap $\varnothing 7,62$ mm'ye genişletilmiştir. Bu değer .308 Winchester kalibresi için önerilen iç çap toleranslarıyla uyumludur ve yiv-set çekme işlemi öncesi ideal taban geometrisini oluşturur. Ayrıca, tüm namlular aynı derin delik çapı ve rayba çapı ile işlenerek, sadece kesme ve ilerleme hızı parametrelerinin etkilerinin karşılaştırılmasına olanak tanınmıştır. Sonuç olarak, rayba çapı seçimi yalnızca mekanik uygunluk açısından değil, aynı zamanda atış doğruluğu ve dağılım kararlılığı açısından da doğrudan belirleyici bir unsurdur.

3.3 Yiv-Set Çekme İşlemi

Bu çalışmada kullanılan namluların yiv ve set yapıları, çekme yöntemi (button rifling) ile oluşturulmuştur. Bu yöntemde, yüzeyi spiral yiv ve set profiline sahip olan karbür esaslı sert metal "button" takımı, namlu içerisine yüksek basınçla çekilerek ilerletilmiştir. Takım, aynı anda dönme ve ilerleme hareketiyle namlu boyunca ilerleyerek profil geometrisini malzeme içerisine plastik deformasyonla aktarmıştır.

Tüm namlular için yiv ve set sayısı sabit tutulmuş olup; çap, adım boyu ve derinlik gibi geometrik parametreler .308 Winchester kalibreye uygun olarak standardize edilmiştir. Yiv çekme işlemi, özel olarak tasarlanmış Unisig marka çekme tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında, yiv çekme işlemi sabit parametrelerle gerçekleştirilmiş, yalnızca Namlu 6'da çekme hızı değiştirilmiştir. Böylece, şekillendirme hızının kalıntı gerilmelere ve isabet dağılımına etkisi izole olarak analiz edilmiştir.

Uygulanan çekme işlemi sırasında oluşabilecek yüzey altı deformasyonların minimize edilmesi ve takım merkezlemesinin tam sağlanması amacıyla, namlu iç yüzeyleri öncesinde raybalama ile hazırlanmış; işlem boyunca eksenel hizalama ve takım geometrisi sürekli kontrol edilmiştir.

3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri

Raybalama ve yiv-set çekme işlemleri sonrasında elde edilen namlu iç yüzeylerinin işlenmiş kalitesini değerlendirmek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, her bir üretim parametresi kombinasyonu ile işlenmiş namluların iç yüzey karakteristiklerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Ölçümler, taşınabilir temaslı profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup (Şekil 3.4), cihaz kalibrasyonu her ölçüm öncesinde üretici talimatlarına uygun şekilde yapılmıştır. Ölçüm ucu, namlu eksenini boyunca hareket ettirilerek belirlenen üç farklı noktadan veri alınmıştır. Her namlu için ölçüm noktaları, yiv ve set arasındaki geçiş bölgelerinde olacak şekilde seçilmiştir. Böylece hem düz set bölgesi hem de geçişli yiv bölgesindeki yüzey topografyası değerlendirilmiştir.

Ölçümlerde, en yaygın yüzey pürüzlülük parametresi olan R_a (ortalama pürüzlülük) kullanılmıştır. Ölçüm uzunluğu ve kesme filtresi değerleri cihaz standardına uygun olarak sabit tutulmuş, her ölçüm en az üç kez tekrarlanarak ortalama değerler alınmıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, ilgili namlunun üretim parametreleriyle ilişkilendirilerek karşılaştırmalı analizlere temel oluşturmuş; özellikle kesme ve ilerleme hızındaki değişimlerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri sayısal olarak ortaya konmuştur.



Şekil 3.4 Namlu 2-2'nin yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

3.5 Numunelerin Kalıntı Gerilme Analizi

Yiv-setli namluların üretim süreçlerinden kaynaklanan içsel gerilme durumlarını değerlendirmek amacıyla, kalıntı gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, X-ışını kırınımı XRD yöntemiyle yapılmış olup, her namlu için üretim sonrası gerilme profili belirlenmiştir. Ölçümler, sabit konumlandırılmış Stresstech marka G2R modeli XRD

cihazı kullanılarak (Şekil 3.5), namlu iç yüzeyinde yiv-set geometrisinin ortasına karşılık gelen bölgede gerçekleştirilmiştir. Her namludan yalnızca bir numune seçilmiş ve analizler set bölgesi merkezlenerek yapılmıştır. Numuneler, cihaz tutucusuna yerleştirilmeye uygun hâle getirilmiş ve sabit bir referans eksenine göre hizalanmıştır. Gerilme ölçümleri üç farklı derinlik (Yüzey (0 μm), 25 μm ve 50 μm) seviyesinde uygulanmıştır. Malzemenin Elastisite Modülü $E = 210 \text{ GPa}$ ve Poisson Oranı $\nu = 0,3$ alınmıştır. Her derinlik seviyesi için ölçüm öncesi yüzey, hassas zımpara ve elmas süspansiyonla mekanik olarak parlatılarak ölçüm yüzeyinin düzgünlüğü ve yansıtıcılığı optimize edilmiştir. Özellikle alt katman ölçümleri için ardışık aşındırma uygulanmış ve her adım sonrası kalıntı gerilme ölçümleri ayrı ayrı yapılmıştır. XRD ölçümleri sırasında $\sin^2\psi$ yöntemi kullanılmış; analiz parametreleri, çelik malzemelerde uygulanan standart ayarlara göre yapılandırılmıştır. Ölçüm sonuçları, üretim parametreleri ile ilişkilendirilerek her bir işlemin kalıntı gerilme profiline olan etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir. Grafiklerde yer alan gerilme bileşenleri, ölçüm yönelimlerine göre adlandırılmıştır. Bu kapsamda, σ_x simgesi 0° yönünde, yani namlu eksenini boyunca ölçülen eksenel kalıntı gerilmeleri ifade etmektedir. σ_{xy} , 45° yönündeki çapraz gerilmeleri temsil ederken; σ_y ise 90° yönünde, namlu çevresini saran çevresel gerilmeleri tanımlamaktadır.



Şekil 3.5 Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan XRD cihazı ve namlu aparatı.

3.6 Dağılım Testleri

105 metre mesafedeki hedef kağıdına beşer atış yapılır ve atışlar arasındaki en uzak mesafede bulunan atış değerlendirmeye alınmaz. Dört grup atışın ortalaması alınarak namlunun dağılım değeri hesaplanır (Şekil 3.6).

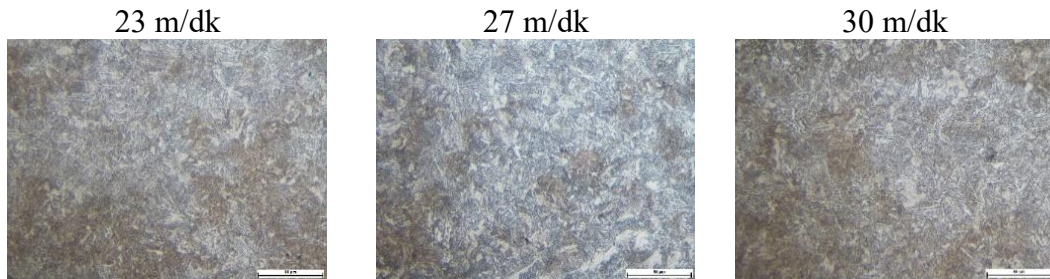


Şekil 3.6 105 metre mesafeye yapılan atışın hedef görüntüsü ve MOA analizi (Ballistic-X uygulaması ile elde edilmiştir).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

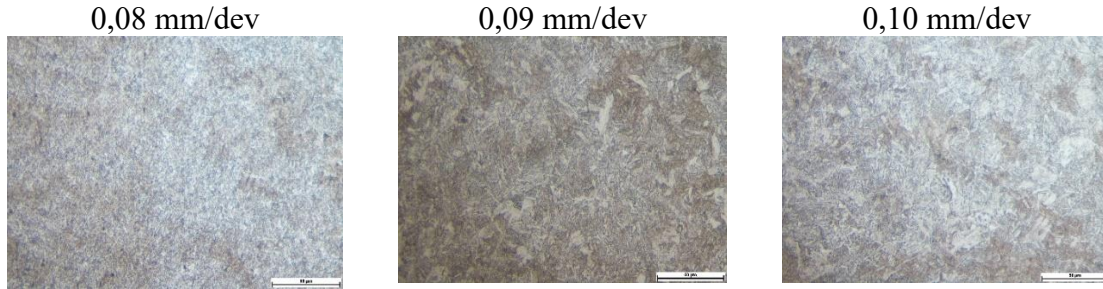
4.1 Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Tel erezyon yöntemiyle kesilerek kalıntı gerilme analizi için ayrılan namluların diğer yarısından kesit alınmış ve numuneler bakalit ile kalıplandırılmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme 4140 (42CrMo4) çeliği olup, 29 HRc sertliğe sahiptir. Numunelere %3'lük nital çözeltisi ile 15 saniye dağlama işlemi uygulanmış ve ardından optik mikroskop ile 500 kat yakınlaştırma ile mikroyapı görüntüleri (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) elde edilmiştir. Kullanılan çeliğe ait üç farklı mikroyapı görüntüsü, sırasıyla 23 m/dk, 27 m/dk ve 30 m/dk kesme hızlarında işlenmiş namlu numunelerine aittir. Tüm görüntüler aynı büyütmeye altında incelenmiş olup, kesme hızının mikroyapı üzerindeki etkilerini karşılaştırmaya olanak tanımaktadır. Genel olarak tüm numunelerde ısıtıl işlem görmüş çeliklerde tipik olarak karşılaşılan temperlenmiş martensitik yapı gözlemlenmektedir. 23 m/dk kesme hızına sahip numunede, mikroyapının daha düzensiz ve faz sınırlarının belirginliğinin düşük olduğu, yer yer koyu tonlu alanların bulunduğu görülmektedir. Bu durum, kesme sırasında oluşan ısıtıl ve mekanik etkinin sınırlı kaldığını ve fazlar arası ayrımın netleşmediğini göstermektedir. Buna karşın 27 m/dk ile işlenmiş numunede, martensitik iğne yapılar daha homojen bir şekilde dağılmış, yapı içindeki fazlar belirginleşmiş ve mikroyapı genel olarak dengeli bir görünüm sergilemiştir. Bu durum, kesme işlemi sırasında oluşan termomekanik etkilerin mikroyapıyı optimize edecek düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. En yüksek kesme hızı olan 30 m/dk uygulanan numunede ise martensitik yapılar daha ince, sık ve belirgin hale gelmiş; bu da daha yüksek kesme hızının etkisiyle yüzeyde faz dönüşümünün yoğunlaştığını ve hızlı soğuma nedeniyle daha yoğun bir martensitik yapı oluştuğunu düşündürmektedir. Sonuç olarak, kesme hızı mikroyapının morfolojisini doğrudan etkilemekte olup, orta seviye bir kesme hızı olan 27 m/dk, yapısal homojenlik açısından en uygun sonucu vermiştir.



Şekil 4.1 Farklı kesme hızı parametrelerinin mikroyapı görüntüleri.

Aynı kesme hızı (27 m/dk) ile işlenmiş 4., 5. ve 6. namlulara ait mikroyapı görüntüleri, ilerleme hızının (0,08, 0,09 ve 0,10 mm/dev) mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla karşılaştırılmıştır. 4 numaralı namluda kullanılan en düşük ilerleme hızı olan 0,08 mm/dev' de, mikroyapının daha homojen ve sık dokulu bir yapıya sahip olduğu, martensitik fazların oldukça ince ve düzgün dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu yapı, kesme işlemi sırasında oluşan termomekanik etkinin daha kontrollü dağıldığını ve yüzey altı mikro deformasyonun minimum seviyede olduğunu göstermektedir. 5 numaralı namluya ait 0,10 mm/dev ilerleme hızında ise, daha iri taneli martensit yapılar ve daha belirgin faz ayrımları dikkat çekmektedir. Bu, yüksek ilerleme hızının oluşturduğu daha fazla plastik deformasyon ve kesme bölgesinde ani sıcaklık artışlarının mikroyapıya daha yoğun şekilde etki ettiğini göstermektedir. 6 numaralı namluda kullanılan 0,09 mm/dev ilerleme hızı ile elde edilen mikroyapı ise, 4. ve 5. numaralı numuneler arasında geçiş niteliğindedir. Martensitik yapılar orta kalınlıkta olup hem homojenlik hem de faz netliği bakımından dengeli bir görünüm sunmaktadır. Sonuç olarak, ilerleme hızının mikroyapı morfolojisini doğrudan etkilediği; düşük ilerleme hızlarında daha homojen ve rafine, yüksek ilerleme hızlarında ise daha yoğun deformasyonlu ve belirgin yapılar oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.2 Farklı ilerleme hızı parametrelerinin mikroyapı görüntüleri.

4.2 Dağılım ve Raybalama Sonrası Namlu İçi Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

Atış testleri gerçekleştirilen namluların dağılım performanslarına ilişkin elde edilen veriler Çizelge 4.1’de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Bu veriler, her bir namlunun atış hassasiyeti ve isabet kabiliyeti açısından değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. İlk atışlara kıyasla, atış sayısı arttıkça dağılım değerlerinin büyük kısmının belirgin şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Yeni bir tüfek ile atış yapıldığında, ilk atışlarda dağılım

değerlerinin zamanla iyileştiği gözlemlenebilir. Bu durum, namlu iç yüzeyindeki mikroskobik pürüzlerin ve talaş izlerinin, atışlar sırasında mermi geçişiyle aşındırılarak daha düzgün bir hale gelmesiyle açıklanabilir (Christensen Arms t.y.). Bu süreçte, mermi geçişi sırasında oluşan bakır birikintileri, namlu iç yüzeyindeki mikro düzensizlikleri doldurarak yüzeyin daha homojen olmasına katkı sağlar.

Bazı uzmanlar, bu rodaj sürecinin, özellikle yüksek kaliteli el yapımı namlular için gerekli olmadığını belirtirken, seri üretim namlularında bu sürecin grupman iyileşmesine katkı sağlayabileceğini ifade etmektedirler (von Benedikt 2023). Rodaj işlemi sırasında, belirli bir atış ve temizlik döngüsü uygulanarak, namlu iç yüzeyinin daha düzgün hale gelmesi ve bakır birikintilerinin kontrol altına alınması hedeflenir (Criterion Barrels 2014).

Rodaj sürecinin etkileri, namlu iç yüzeyinin pürüzlülüğü, bakır birikimi ve grupman değerleri gibi parametrelerle değerlendirilebilir. Bu süreçte, namlu iç yüzeyinin daha düzgün hale gelmesi, mermi geçişinin daha stabil olmasını sağlayarak, atışların daha tutarlı ve sıkı bir grupman oluşturmaya katkıda bulunabilir.

Diğer yandan, aynı namluların üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de gerçekleştirilmiş olup, bu değerlere ilişkin sonuçlar Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Namluların dağılım test değerleri çizelgesi.

	1.Atış (MOA)	2. Atış (MOA)	3.Atış (MOA)	4.Atış (MOA)	Ortalama (MOA)
Namlu 1	1,827	0,965	0,982	0,874	1,162
Namlu 2	1,516	0,959	0,895	0,924	1,073
Namlu 3	2,460	1,252	0,971	1,051	1,433
Namlu 4	1,372	2,113	1,135	1,210	1,457
Namlu 5	2,411	1,769	1,273	1,198	1,662
Namlu 6	1,411	1,391	1,032	0,991	1,206

Bu çalışmada, farklı üretim parametreleriyle üretilmiş altı adet namlu kullanılmıştır. Her namlu için aynı atış prosedürü uygulanmıştır. İlk olarak, her namlu ile üç grup atış yapılmış ve her grupta beş mermi kullanılmıştır (toplam 15 mermi). Ardından her namlu ile altı adet daha dağılıma bakmaksızın atış yapılmıştır. Son olarak, her namlu ile bir grup

dağılım atışı daha gerçekleştirilmiş ve beş mermi daha kullanılmıştır. Bu doğrultuda, her bir namlu için toplam 26 adet mermi ile atış yapılmıştır. Bu işlem altı namlu için tekrarlanmıştır.

Yapılan atışlar sonrasında altı farklı namlu örneğine ait ölçüm değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu değerler, ortalama MOA değerlerine göre küçükten büyüğe sıralandığında, Namlu 2 (1,074), Namlu 1 (1,162), Namlu 6 (1,206), Namlu 3 (1,434), Namlu 4 (1,458) ve Namlu 5 (1,663) şeklinde bir dağılım göstermektedir.

Ayrıca sadece son atış (4. atış) değerlerine göre sıralama yapıldığında ise, Namlu 1 (0,874), Namlu 2 (0,924), Namlu 6 (0,991), Namlu 3 (1,051), Namlu 5 (1,198) ve Namlu 4 (1,210) şeklinde bir sıralama ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, her bir üretim parametresi kombinasyonu için iki adet namlu numunesi üretilmiştir. Numunelerden biri dağılımı testlerinde, diğeri ise kalıntı gerilme analizleri için kullanılmıştır.

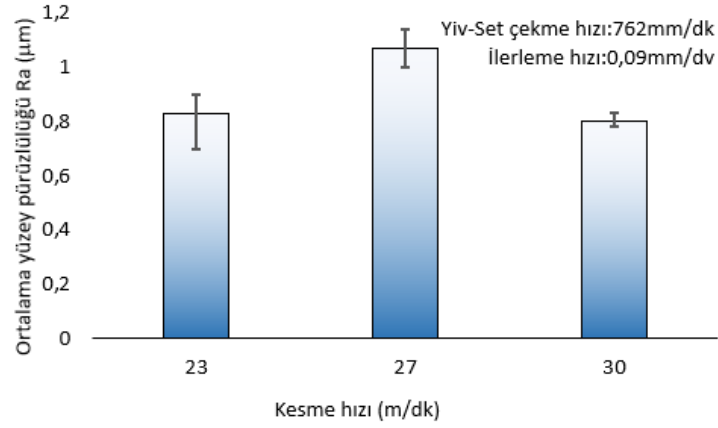
Numaralandırma sistemi ise şu şekildedir, Namlu 1-1, Namlu 2-1, ... Namlu 6-1 dağılım testleri için kullanılmıştır. Namlu 1-2, Namlu 2-2, ... Namlu 6-2 ise XRD analizleri için kullanılmıştır.

Bu şekilde, her üretim parametresi için hem atış performansı hem de mikroyapısal gerilme durumu değerlendirilebilmiştir.

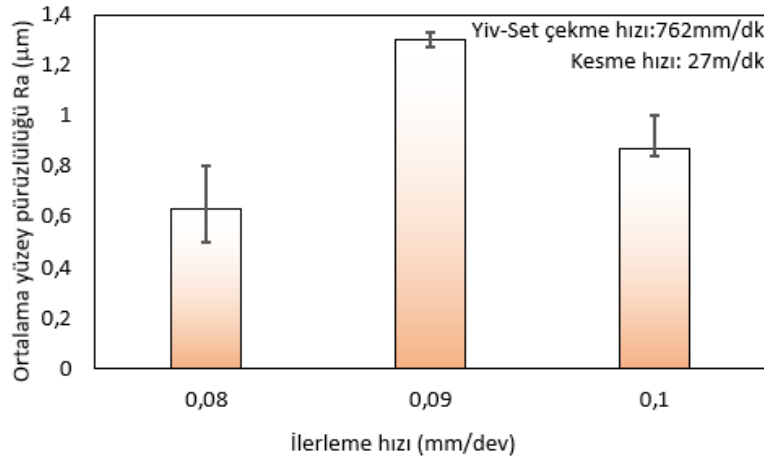
Çizelge 4.2 Namlu yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri çizelgesi.

Namlu No	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)			Ortalama
	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	
Namlu 1-1	1,1	1	1,1	1,07
Namlu 1-2	0,8	0,8	0,9	0,83
Namlu 2-1	0,7	0,9	0,9	0,83
Namlu 2-2	0,5	0,6	0,6	0,57
Namlu 3-1	0,8	0,8	0,8	0,8
Namlu 3-2	0,9	1	0,9	0,93
Namlu 4-1	0,6	0,5	0,8	0,63
Namlu 4-2	0,7	0,7	0,9	0,77
Namlu 5-1	0,9	1	0,7	0,87
Namlu 5-2	1,4	1,2	1,1	1,23
Namlu 6-1	1,3	1,3	1,3	1,3
Namlu 6-2	1,3	1,1	1,5	1,3

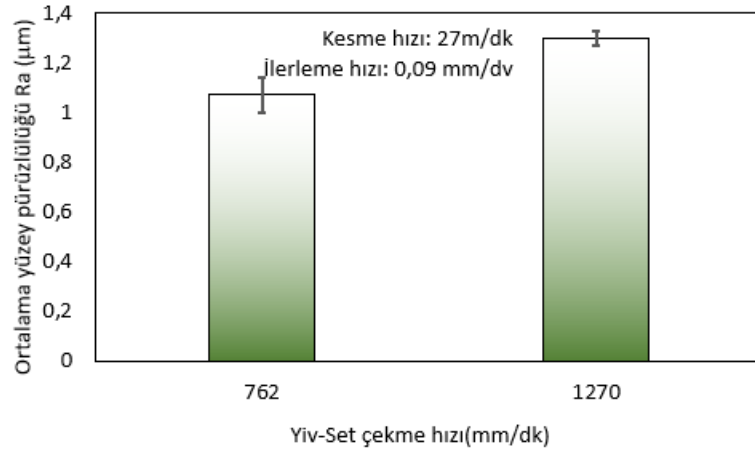
Ayrıca kesme hızı (Şekil 4.3) parametrelerinin, ilerleme hızı (Şekil 4.4) parametrelerinin ve yiv-set çekme hızı (Şekil 4.5) parametrelerinin yüzey pürüzlülük tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.3 Kesme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.



Şekil 4.4 İlerleme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.



Şekil 4.5 Yiv-set çekme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülük tablosu.

Çizelge 4.2’de ölçülmüş olan yüzey pürüzlülük değerleri üzerinden raybalamanın etkilerine bakacak olursak, Namlu 1, 27 mm/dk kesme hızı ve 0,09 mm/dev ilerleme oranı ile referans düzeyde değerlendirilebilecek bir üretim parametresi setine sahiptir. Bu namluya ait iki parçanın yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla $R_a = 1,1, 1$ ve $1,1 \mu\text{m}$ ve $R_a = 0,8, 0,8$ ve $0,9 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, ortalama R_a değeri sırasıyla $1,07 \mu\text{m}$ ve $0,83 \mu\text{m}$ bulunmuştur. Bu değerlerle yüzey pürüzlülüğü, ilerleyen karşılaştırmalarda referans noktası olarak değerlendirilecektir.

Namlu 2’de kesme hızı 23 mm/dk ile düşürülmüş, diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bu değişiklik sonucunda R_a değerleri sırasıyla $0,7, 0,9$ ve $0,9 \mu\text{m}$ ve $0,5, 0,6$ ve $0,6 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, ortalama R_a değeri $0,83 \mu\text{m}$ ve $0,57 \mu\text{m}$ bulunmuştur. Bu durum, kesme hızının düşürülmesinin yüzey kalitesini iyileştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Namlu 3, 30 mm/dk kesme hızı ile en yüksek değere sahiptir. Diğer parametreler sabit kalmıştır. Üretilen iki parçada R_a değerleri $0,8, 0,8$ ve $0,8 \mu\text{m}$ ve $0,9, 1$ ve $0,9 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, ortalama R_a değeri $0,80 \mu\text{m}$ ve $0,93 \mu\text{m}$ bulunmuştur. R_a ortalamaları Namlu 1’e benzer düzeyde kalmakla birlikte, kesme hızının artmasının yüzey kalitesine olan etkisinin sınırlı olduğu, dolayısıyla belirli sınırlar içerisinde bu parametrenin artırılabilirliği anlaşılmaktadır.

Namlu 4’te ilerleme oranı $0,08 \text{ mm/dev}$ ’ e düşürülmüştür. Bu durumda R_a değerleri $0,6, 0,5$ ve $0,8 \mu\text{m}$ ve $0,7, 0,7$ ve $0,9 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, ortalama R_a değeri $0,63 \mu\text{m}$ ve $0,77 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Namlu 1’e göre daha düşük değerler elde edilmesi, ilerlemenin azaltılmasının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini göstermektedir.

Namlu 5, $0,10 \text{ mm/dev}$ ilerleme oranı ile en yüksek değere sahiptir. Üretilen parçalarda R_a değerleri $0,9, 1$ ve $0,7 \mu\text{m}$ ve $1,4, 1,2$ ve $1,1 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, ortalama R_a değerleri sırasıyla $0,87 \mu\text{m}$ ve $1,23 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, ilerleme oranının artmasının yüzey kalitesini belirgin şekilde olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Talaş hacminin artması ve kesici takım ile iş parçası arasındaki kuvvetlerin yükselmesi, yüzeyde daha fazla deformasyona neden olmuş olabilir.

Namlu 6'da kesme hızı (27 mm/dk) ve ilerleme oranı (0,09 mm/dev) Namlu 1 ile aynıdır; aradaki tek fark, yiv-set çekme hızının 792 mm/dk'dan 1270 mm/dk'ya çıkarılmış olmasıdır. Bu parametre farkı sonucunda, Ra değerleri 1,3, 1,3 ve 1,3 μm ve 1,3, 1,1 ve 1,5 μm olarak ölçülmüş, her iki parçanın ortalama Ra değeri de 1,3 μm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Namlu 1'in ortalamalarına kıyasla yüzey pürüzlülüğünde belirli bir artışa işaret etmektedir. Yiv-set işleminin daha yüksek hızda gerçekleştirilmesi, takım ile malzeme arasındaki etkileşim süresini kısaltarak yüzeyde daha sınırlı bir işleme kalitesi bırakmış olabilir. Ayrıca bu durum, mikro düzeyde deformasyon veya takım izlerinin belirginleşmesine yol açmış olabilir.

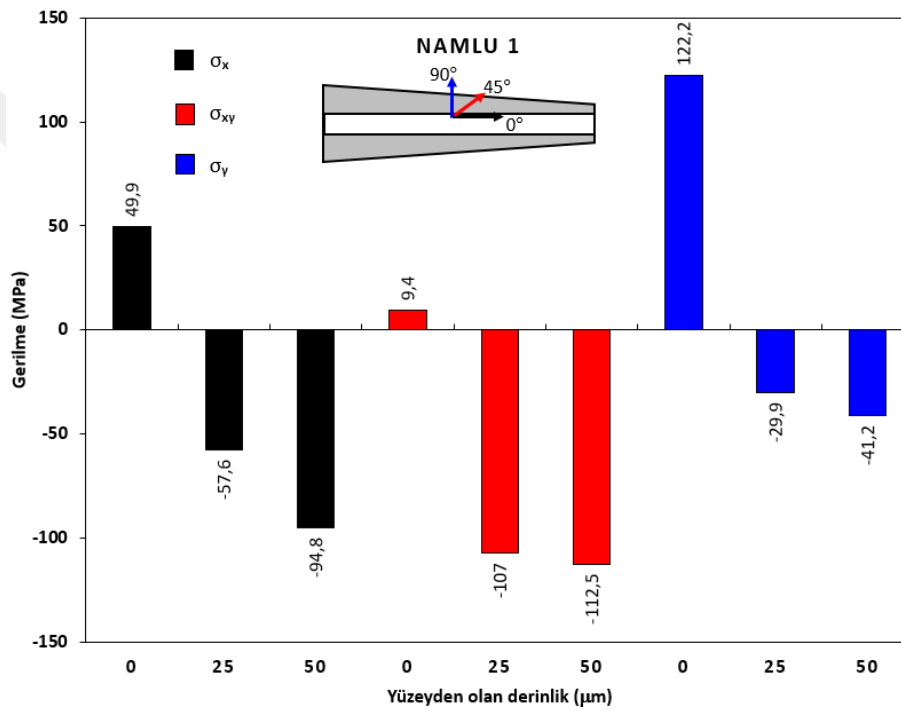
4.3 Raybalama Parametrelerinin Etkisi

Namlu 1'e ait kalıntı gerilme dağılımı, raybanın kesme hızı 27 m/dk ve 0,09 mm/dev ilerleme değerleri ile üretilmiş olan namlunun yüzeyden derine doğru artan şiddette çekme gerilmelerinin oluştuğunu ve bu dağılımın yönelime bağlı olarak belirgin şekilde farklılaştığını göstermektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, σ_x (0°) yönünde yüzeyde yaklaşık +49,9 MPa seviyesinde çekme gerilmesi ölçülürken, 25 μm ve 50 μm derinliklerde bu değer hızla basma gerilmesine dönmekte ve sırasıyla -57,6 MPa ile -94,8 MPa düzeylerine ulaşmaktadır.

Bu durum, yiv-set çekme işlemi sırasında yüzeye yakın bölgelerde oluşan plastik şekil değişiminin yüzeyde çekme gerilmelerine, iç bölgelerde ise ters yönde dengeleyici basma gerilmelerine yol açtığını ortaya koymaktadır. Benzer bir eğilim σ_{xy} (45°) yönünde de gözlenmekte, burada yüzeyde oldukça düşük bir çekme gerilmesi +9,4 MPa görülmesine karşın, alt bölgelerde -107 MPa ile -112,5 MPa gibi yüksek basma gerilmeleri oluşmaktadır.

Bu yönelim, malzeme içinde eğik düzlemdaki kayma gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgeleri temsil ettiğinden, şekillendirme işleminin doğrudan etkisinin en net hissedildiği doğrultudur. En çarpıcı durum ise σ_y (90°) yönünde ortaya çıkmakta, yüzeyde +122,2 MPa gibi oldukça yüksek bir çekme gerilmesi izlenirken, bu değer 25 μm ve 50 μm derinlikte sırasıyla -29,9 MPa ve -41,2 MPa'ya gerilemektedir. Radyal yönde oluşan bu

yüksek çekme gerilmesi, çekme yönteminin yüzeyde bıraktığı gerilim izlerini yansıtmakta, literatürde Withers ve Bhadeshia (2001) tarafından tanımlanan üretim kaynaklı termomekanik kalıntı gerilme profilinin karakteristik yapısına benzerlik göstermektedir. Öte yandan bu gerilme yapısı, merminin namlu içerisinde dönme stabilitesini etkileyerek çıkış yönünü ve dolayısıyla hedefteki dağılımı belirleme potansiyeline sahiptir. Tez kapsamında referans olarak alınan bu dağılım, diğer namlularla karşılaştırmalı analizlerde raybalama ve yiv-set parametre değişimlerinin etkisini daha sağlıklı değerlendirmek adına kritik bir temel oluşturmaktadır.



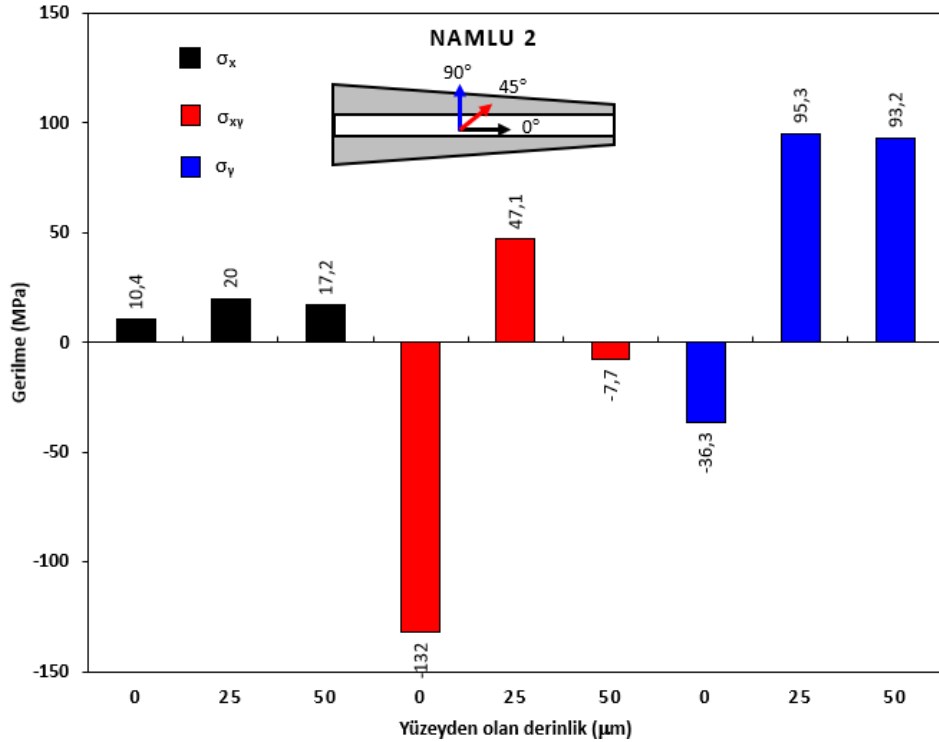
Şekil 4.6 Namlu 1'in 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.

Namlu 2'deki kalıntı gerilmelerde ise raybanın kesme hızı 23 m/dk ve 0,09 mm/dev ilerleme değerleri ile üretilmiş olan namlunun, yüzey altı gerilme dağılımı üzerinde belirgin bir etki yarattığını göstermektedir. Şekil 4.7'de sunulan verilere göre σ_x (0°) yönünde tüm derinliklerde (0, 25 ve 50 µm) çekme yönünde ve düşük şiddette gerilmeler gözlemlenmiştir; bu değerler sırasıyla 10,4 MPa, 20 MPa ve 17,2 MPa' dır.

Bu sonuç, düşük kesme hızının talaş kaldırma sırasında oluşan plastik deformasyonu sınırladığını ve yüzey altına fazla gerilme birikimi oluşturmadığını göstermektedir. σ_{xy} (45°) yönünde yüzeyde -132 MPa gibi oldukça yüksek bir basma gerilmesi, 25 µm

derinlikte ise 47,1 MPa gibi ani bir çekme gerilmesi gözlenmektedir. Bu ani geçiş, eğik düzlemdeki şekil değiştirme rejimlerinin hassas olduğunu ve düşük kesme hızının yüzeyde yoğun plastik deformasyona neden olabileceğini işaret etmektedir. 50 μm derinlikte ise gerilme tekrar -7,7 MPa seviyesine düşmektedir. σ_y (90°) yönünde, yani radyal doğrultuda, yüzeyde -36,3 MPa'lık bir basma gerilmesi gözlenmiştir; buna karşın 25 ve 50 μm derinliklerde gerilmeler sırasıyla 95,3 MPa ve 93,2 MPa gibi yüksek çekme değerlerine dönüşmüştür.

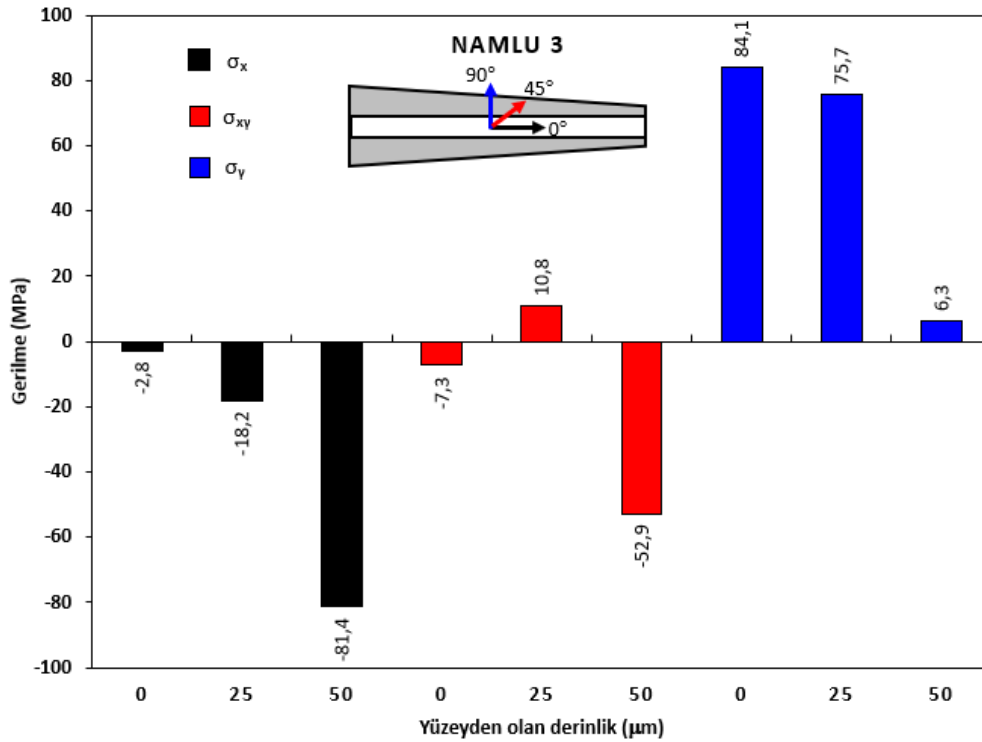
Bu tersine eğilim, düşük kesme hızının yüzeyde sertleşme etkisi yaratarak yüzey altında kalıntı basma gerilmelerinin birikmesine yol açtığını göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde bildirilen bulgularla da örtüşmektedir. Özellikle (Liu vd. 2015) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, düşük kesme hızları ile işlenen çelik yüzeylerde yüzeye yakın bölgelerde daha düşük çekme gerilmelerinin oluştuğu ve bu gerilmelerin, iş parçasının yüzeyde daha az plastik deformasyona uğramasıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde (MacKenzie 2023) tarafından yapılan çalışmada, düşük kesme hızlarında artan takım-malzeme etkileşimine rağmen daha düşük kalıntı gerilme oluşturduğu vurgulanmıştır.



Şekil 4.7 Namlu 2'nin 0 μm -25 μm -50 μm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.

Namlu 3'te kalıntı gerilme dağılımı, raybanın kesme hızı 30 m/dk ve 0,09 mm/dev ilerleme değerleri ile üretilmiş olan namlunun yüzeyden derine doğru belirgin şekilde değişim gösteren ve yönelime bağlı farklı karakteristikler sergileyen karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, σ_x (0°) yönünde yüzeyde hafif bir basma gerilmesi -2,8 MPa tespit edilirken, derinlik arttıkça bu basma gerilmesi -18,2 MPa' dan -81,4 MPa' ya kadar artmaktadır. σ_{xy} (45°) yönünde ise, yüzey ve 25 μm derinlikte düşük şiddette çekme gerilmeleri +10,8 MPa gözlenirken, 50 μm derinlikte yeniden baskın bir basma gerilmesi -52,9 MPa oluşması eğik düzlemlerdeki plastik şekil değiştirme alanlarının heterojen yapısını yansıtmaktadır.

Radyal doğrultuda, yani σ_y (90°) yönünde, yüzeyden başlayarak iç derinliklere kadar yüksek çekme gerilmeleri hakimdir. Bu çekme gerilmeleri, termomekanik etkiler sonucunda oluşan kalıcı gerilme yapısının önemli bir göstergesidir ve namlu dayanıklılığı ile mermi stabilitesi üzerinde doğrudan etkili olabilir.

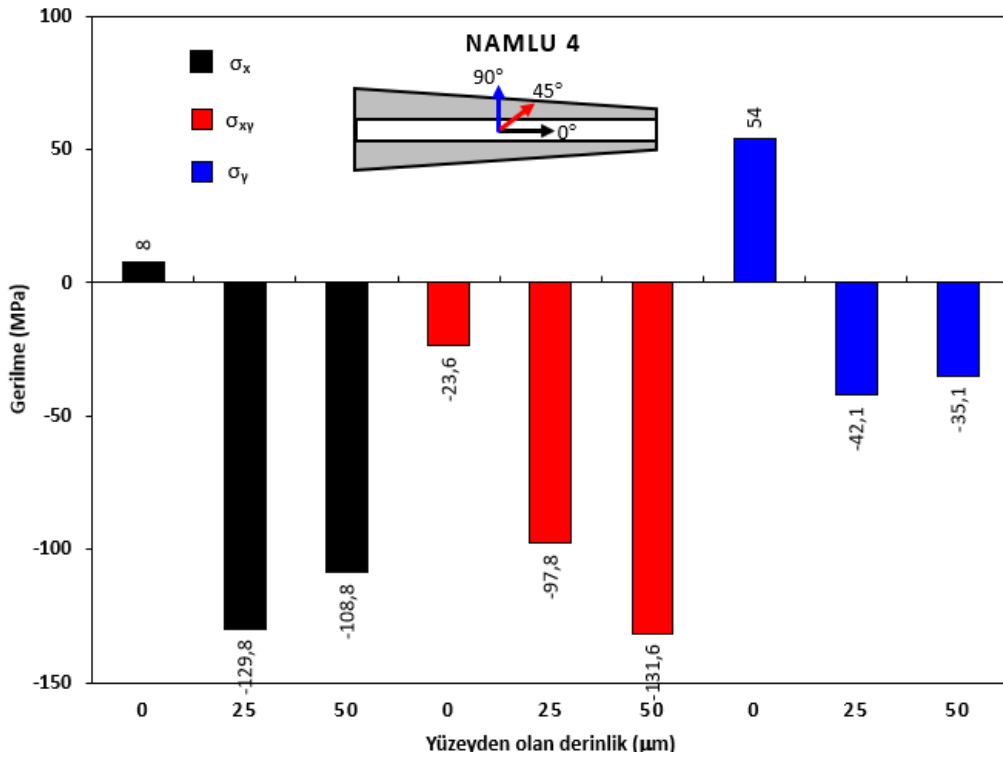


Şekil 4.8 Namlu 3'ün 0 μm -25 μm -50 μm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.

Namlu 4'teki kalıntı gerilme profili, raybanın kesme hızı 27 m/dk ve 0,08 mm/dev ilerleme değerleri ile üretilmiş olan namlunun yüzey ve yüzey altı bölgelerde belirgin

çekme ve basma gerilme farklılıkları içerirken, yönelime bağlı olarak da önemli değişiklikler göstermektedir. Şekil 4.9 verilerine göre, σ_x (0°) yönünde yüzeyde çok düşük çekme gerilmesi 8 MPa saptanırken, 25 ve 50 μm derinliklerde oldukça güçlü basma gerilmeleri -129,8 MPa ve -108,8 MPa tespit edilmiştir.

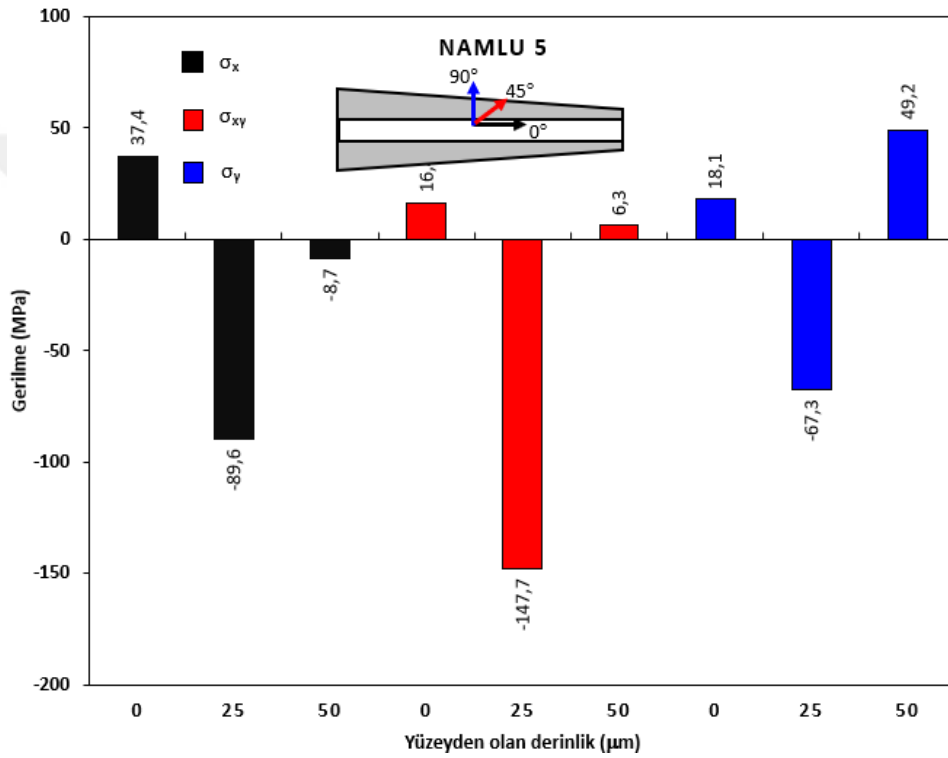
Bu durum, yiv-set işlemi sırasında yüzeye yakın bölgelerde oluşan plastik deformasyonun iç kısımlarda dengeleyici çekme gerilmelerine yol açtığını göstermektedir. σ_{xy} (45°) yönünde ise, yüzey ve alt derinliklerde belirgin basma gerilmeleri -23,6 MPa, -97,8 MPa ve -131,6 MPa hâkim olup, bu da eğik düzlemlerde yoğun plastik deformasyon ve kayma gerilmelerinin varlığını işaret etmektedir. σ_y (90°) yönünde ise yüzeyde belirgin çekme gerilmesi 54 MPa gözlenirken, alt derinliklerde basma gerilmelerine dönüş -42,1 MPa, -35,1 MPa mevcuttur.



Şekil 4.9 Namlu 4'ün 0 μm -25 μm -50 μm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.

Namlu 5'in kalıntı gerilme profili, raybanın kesme hızı 27 m/dk ve 0,1 mm/dev ilerleme değerleri ile üretilmiş olan namlunun yüzeyden derine doğru artan ve yönelime bağlı olarak karmaşık bir gerilme dağılımı sergilemektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, σ_x

(0°) yönünde yüzeyde çekme gerilmesi 37,4 MPa mevcutken, 25 µm derinlikte önemli derecede basma gerilmesi -89,6 MPa tespit edilmiştir. σ_{xy} (45°) yönünde ise yüzeyde nispeten düşük çekme gerilmesi 16,4 MPa görülürken, 25 µm derinlikte oldukça yüksek basma gerilmesi -147,7 MPa hakimdir. σ_y (90°) yönünde yüzeyden derinliğe artan veya azalan karmaşık pozitif ve negatif -67,3 MPa, 18,1 MPa ve 49,2 MPa gerilmeler gözlemlenmektedir. Bu dağılım, üretim parametrelerinin oluşturduğu plastik deformasyonların yüzey ve alt katmanlarda farklı etkiler yarattığını göstermektedir.



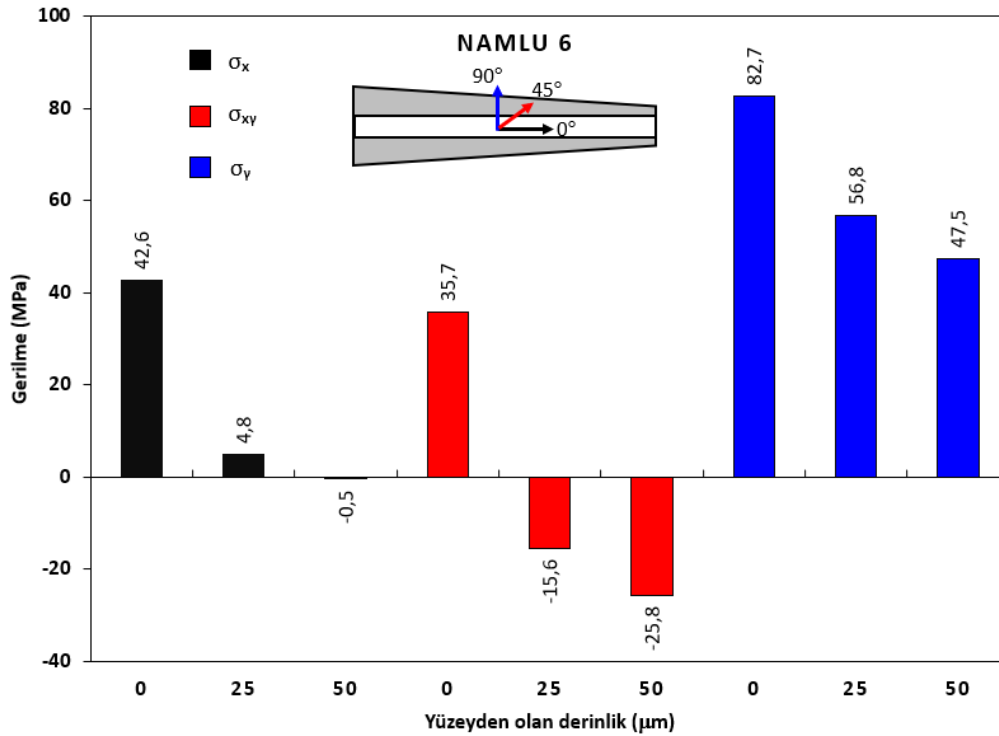
Şekil 4.10 Namlu 5'in 0µm -25µm -50µm derinlikteki kalıntı gerilmelerinin değişimi.

4.4 Yiv-Set Açma İşleminin Etkisi

Bu bölümde, yalnızca yiv-set çekme hızının değiştirildiği iki namlu (Namlu 1 ve Namlu 6) üzerinden bu parametrenin atış doğruluğu üzerindeki olası etkisi değerlendirilmiştir. Her iki namlu da aynı kesme hızı (27 mm/dk) ve ilerleme hızı (0,09 mm/dev) ile raybalanmış; yalnızca yiv-set çekme hızı farklı olarak uygulanmıştır. Namlu 6'da Namlu 1'e kıyasla yiv-set çekme hızı yaklaşık %67 oranında artırılarak 1270 mm/dk olarak belirlenmiştir. Bu değişikliğe rağmen, her iki namlunun ortalama dağılım değerleri benzer seviyelerde çıkmıştır.

Üretim sürecinde yiv-set hızının artırılması, işlem süresini azaltmakla birlikte, sınırlı sayıda numune üzerinden yapılan bu karşılaştırmada, atış doğruluğu üzerinde belirgin bir fark yaratmamıştır. Ancak bu değerlendirme yalnızca iki örnek üzerinden yapıldığı için, genel geçer sonuçlara ulaşmak mümkün değildir; bu nedenle söz konusu ilişkinin daha fazla sayıda numune ile desteklenmesi gerekmektedir.

Namlu 6'ya ait kalıntı gerilme dağılımı (Şekil 4.11), 27 mm/dk kesme hızı ve 0,09 mm/dev ilerleme oranı ile yapılan raybalama sonrası, artırılmış yiv-set çekme hızıyla üretilmiş örnek olarak dikkat çekmektedir. Bu namlu, diğer örneklerle kıyaslandığında görece dengeli bir gerilme profiline sahiptir. σ_x (0°) yönünde yüzeyde 42,6 MPa çekme gerilmesi ölçülmüş, derinlik arttıkça bu gerilme önce 4,8 MPa' a, ardından -0,5 MPa basma gerilmesine dönüşmüştür. σ_{xy} (45°) yönünde ise yüzeyde 35,7 MPa çekme gerilmesi mevcut olup, derinlik arttıkça sırasıyla -15,6 MPa ve -25,8 MPa basma gerilmelerine geçiş gözlemlenmiştir. σ_y (90°) yönünde ise tüm derinliklerde çekme gerilmesi baskındır; sırasıyla 82,7 MPa, 56,8 MPa ve 47,5 MPa değerleri ölçülmüştür. Bu dengeli ve yönelimi koruyan profil, dağılım değerinin düşük kalmasına katkı sağlamış olabilir.

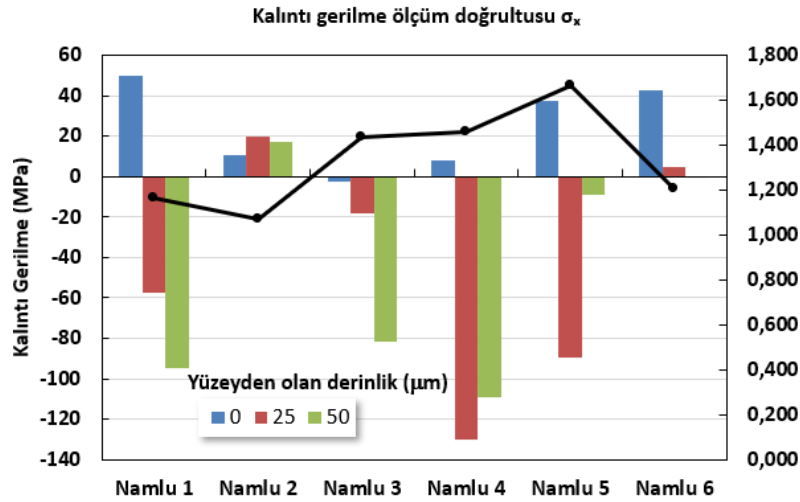


Şekil 4.11 Namlu 6'nın 0µm -25µm -50µm Derinlikteki Kalıntı Gerilmelerinin Değişimi.

4.5 Kalıntı Gerilmelerin İsabet Dağılımına Etkisi

Bu çalışmada, farklı üretim parametreleriyle imal edilen altı adet namluya ait kalıntı gerilme dağılımları, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile üç farklı yönelimde ($0^\circ \sigma_x$, $45^\circ \sigma_{xy}$ ve $90^\circ \sigma_y$) ve üç farklı derinlikte (0, 25, 50 μm) incelenmiştir. Ölçüm sonuçları, elde edilen grupman (MOA) değerleri ile birlikte değerlendirilerek gerilme profillerinin atış doğruluğu üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

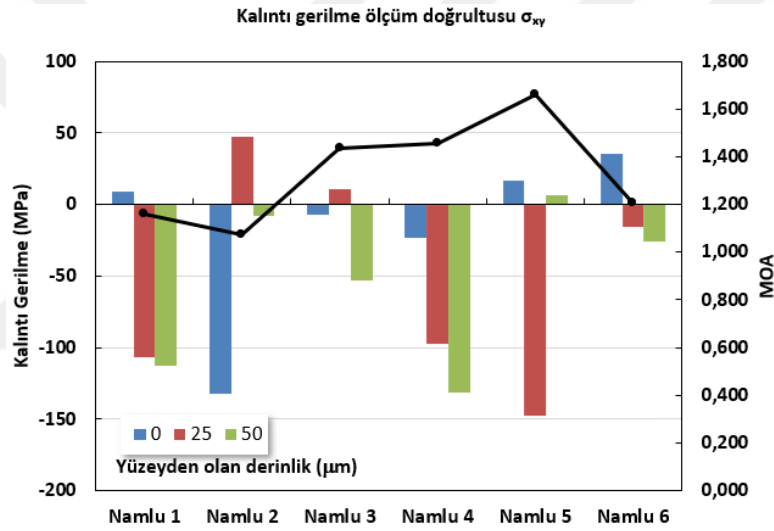
Şekil 4.12, σ_x ölçüm doğrultusunda, yüzeyden itibaren 0, 25 ve 50 mikron derinliklerde elde edilen kalıntı gerilme değerleri ile namluların MOA performansları birlikte sunulmuştur. MOA değerinin düşük olması, atış isabetliliğinin yüksekliğini ifade ettiğinden, grafiklerdeki eğilimler kalıntı gerilme dağılımının bu performans üzerindeki etkisini değerlendirmek açısından önemlidir. Özellikle Şekil 4.12’de görüldüğü üzere, σ_x doğrultusunda, yani namlu eksenine paralel yönde ölçülen kalıntı gerilme değerleri görülmektedir. Bu durum, yüzeye yakın bölgelerde oluşan çekme yönlü kalıntı gerilmelerin, atış sırasında oluşan mekanik deformasyonları artırarak namlu rijitliğini olumsuz etkileyebileceğini ve hedef sapmalarına neden olabileceğini düşündürmektedir.



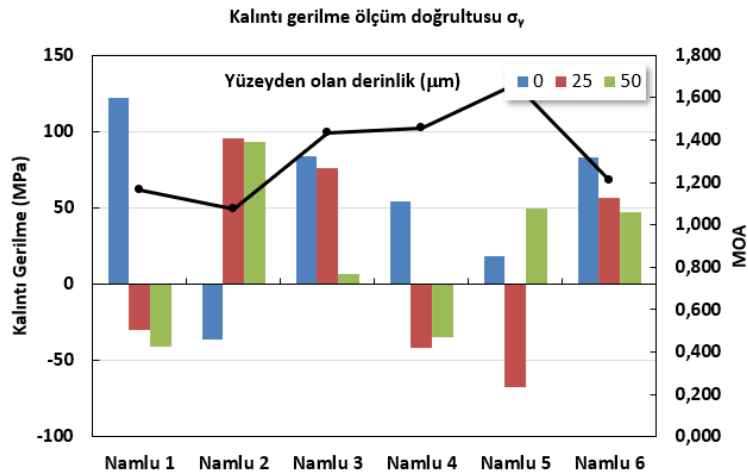
Şekil 4.12 Namluların 0° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.

Şekil 4.13’te gösterilen σ_{xy} yönündeki ölçümlerde ise, MOA ile kalıntı gerilme arasında daha düzensiz ve zayıf bir ilişki gözlemlenmiştir. Bazı namlularda çekme gerilmesinin arttığı derinliklerde MOA’nın da yükseldiği görülse de bu eğilim tüm namlular için geçerli değildir.

σ_y doğrultusundaki verilerin yer aldığı Şekil 4.14 incelendiğinde ise, çevresel yöndeki kalıntı gerilme dağılımının basma veya çekme karakterindeki değişimlere bakılacak olursa Namlu 2’de yüzeyde basma gerilmesi vardır fakat Namlu 1 ve Namlu 6’da çekme gerilmesi mevcuttur fakat aralarındaki dağılım değerleri neredeyse birbirine yakındır. Bu doğrultuda, kalıntı gerilmenin MOA üzerindeki etkisinin yönsel olarak belirgin olduğu, özellikle σ_x doğrultudaki yüzeydeki çekme gerilmelerinin gerilme değerlerinin düşük olduğunda MOA değerini olumsuz etkilemediği söylenebilir. Bu bulgu, namlu üretiminde uygulanan talaşlı imalat ve son işlem parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini ve yüzey altı gerilme dağılımının kontrolünün atış isabetliliği açısından kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.13 Namluların 45° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.



Şekil 4.14 Namluların 90° doğrultusundaki kalıntı gerilme ve MOA değerlerinin değişimi.

Namlu 1 (1,162 MOA) örneğinde, yüzeyde tüm yönlerde çekme gerilmeleri ölçülmüştür: σ_x (0°) yönünde 49,9 MPa, σ_{xy} (45°) yönünde 9,4 MPa ve σ_y (90°) yönünde 122,2 MPa. Ancak derinlik arttıkça bu çekme gerilmeleri basma yönüne dönüşmektedir. Özellikle σ_x ve σ_{xy} yönlerinde 50 μm derinlikte sırasıyla -94,8 MPa ve -112,5 MPa gibi yüksek basma gerilmeleri görülmektedir. Gerilme yönelimi ve büyüklüğündeki bu ani değişimler, atış sırasında yapısal kararlılığı etkileyerek dağılım değerinin yükselmesine neden olabilir.

Namlu 2 (1,073 MOA), çalışmada en düşük dağılım değerine sahip namludur. σ_x yönünde tüm derinliklerde düşük seviyeli çekme gerilmeleri (10,4 MPa, 20 MPa ve 17,2 MPa) bulunurken, σ_{xy} yönünde yüzeyde -132 MPa basma, 25 μm 'de 47,1 MPa çekme ve 50 μm 'de tekrar -7,7 MPa basma gerilmesi gözlemlenmiştir. σ_y yönünde ise yüzeyde basma gerilmesi -36,3 MPa iken, derinlik arttıkça 95 MPa seviyelerine ulaşan istikrarlı çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu yönelimin, mermi ile doğrudan temasta olan yüzeylerde yapısal dengeyi artırarak daha düşük dağılıma katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

Namlu 3 (1,433 MOA) örneğinde, gerilme profili genel olarak basma yönünde seyretmektedir. σ_x ve σ_{xy} yönlerinde yüzeyden derinliğe artan basma gerilmeleri gözlemlenirken, σ_y yönünde yüzeyde yüksek çekme gerilmesi (84,1 MPa) bulunmakta, bu değer 50 μm 'de 6,3 MPa seviyesine kadar azalmaktadır. Gerilme şiddetindeki bu dengesizlik, atış anında merminin eksenel ilerleyişini olumsuz etkileyerek isabetliliği düşürmüş olabilir.

Namlu 4 (1,457 MOA) örneğinde, tüm yönlerde yüzey altına doğru yüksek basma gerilmeleri tespit edilmiştir. σ_x yönünde -129,8 MPa, σ_{xy} yönünde -131,6 MPa ve σ_y yönünde -42,1 MPa seviyelerine ulaşan bu gerilmeler, çevresel stabiliteyi zayıflatmış ve termomekanik yükler altında deformasyon riskini artırmıştır. σ_y yönünde yalnızca yüzeyde 54 MPa'lık bir çekme gerilmesi tespit edilmiş, ancak bu denge derinlikte korunamamıştır.

Namlu 5 (1,662 MOA), çalışmanın en yüksek dağılım değerine sahip namlusudur. Özellikle σ_{xy} yönünde 25 μm derinlikte tespit edilen -147,7 MPa'lık yoğun basma gerilmesi, yüzey gerilmesiyle büyük bir fark oluşturarak içsel yapısal dengesizliğe neden

olmuştur. σ_x yönünde de benzer şekilde yüzeyde çekme, derinlikte basma gerilmeleri yer almaktadır. σ_y yönünde ise gerilme profili dengesiz seyretmiş; sırasıyla 18,1 MPa çekme, -67,3 MPa basma ve 49,2 MPa çekme değerleri elde edilmiştir. Bu tür yönsel tutarsızlıklar, atış sırasında merminin yörüngesini bozarak isabetliliği ciddi şekilde düşürmüştür.

Namlu 6 (1,206 MOA) örneği, görece dengeli bir gerilme dağılımına sahiptir. σ_x ve σ_{xy} yönlerinde yüzeyde çekme gerilmeleri mevcutken, derinlik arttıkça bu değerler basma yönüne geçmektedir. σ_y yönünde ise tüm derinliklerde çekme gerilmesi korunmuştur (82,7 MPa, 56,8 MPa ve 47,5 MPa). Özellikle bu yönelimin korunmuş olması, mermi ilerleyişini destekleyen stabil bir yapı oluşturmuş ve dağılım değerinin nispeten düşük kalmasını sağlamıştır.

4.6 Hedeflenen İsabet Kabiliyetine Ulaşma Durumu

Bu çalışmanın temel amacı, üretim sürecinde uygulanan farklı parametrelerin atış doğruluğu üzerindeki etkilerini inceleyerek, en düşük dağılım değerlerinin hangi koşullar altında elde edilebileceğini ortaya koymaktır. Elde edilen bulgular, test edilen tüm namluların grupman değerlerinin 1 MOA sınırının üzerinde kaldığını göstermektedir. Ancak belirli üretim parametreleri altında bu değer anlamlı biçimde azaltılabildiği de açıkça görülmüştür.

Özellikle raybalama işlemi sırasında uygulanan ilerleme ve kesme hızı, yiv-set çekme hızı ile birlikte oluşan kalıntı gerilme profilleri, atış doğruluğu üzerinde belirleyici faktörler olarak öne çıkmıştır.

Her ne kadar ticari olarak temin edilen namlularda genellikle 1 MOA altında grupman değerleri garanti edilmekte olsa da bu çalışmada kullanılan prototip namlular için bu seviyeye tam olarak ulaşamamıştır. Ancak elde edilen veriler, üretim parametrelerinin uygun şekilde optimize edilmesi durumunda bu hedefe yaklaşılabileceğini göstermektedir. Özellikle üretim sürecinde oluşan gerilme dağılımı ve yüzey bütünlüğünün kontrol altında tutulması, yüksek doğrulukta atış yapabilen namluların üretimi için kritik öneme sahiptir.

5. SONUÇ

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı üretim parametreleriyle imal edilmiş altı adet yivli-setli namlu üzerinde yapılan XRD temelli kalıntı gerilme analizleri ve dağılım testleri değerlendirilmiştir. Araştırmanın temel hedefi, raybalama parametrelerinin üretim süreci sonunda oluşan kalıntı gerilme profilleri ile atış doğruluğu arasında potansiyel ilişkileri gözlemlemektir.

Çalışma bulguları, bazı üretim parametrelerinin dağılım değerleriyle birlikte değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 23 mm/dk kesme hızı ve 0,09 mm/dev ilerleme oranıyla üretilen namluların daha düşük dağılım değerleri sunduğu gözlenmiştir. Ayrıca yiv-set çekme hızının artırıldığı örnekte (Namlu 6), bu değişikliğin dağılım performansını belirgin şekilde olumsuz etkilemediği tespit edilmiştir.

Kalıntı gerilme analizlerinde ise özellikle Namlu 2, diğer namlulara kıyasla düşük seviyeli çekme ve basma gerilmeleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca bu namluda farklı yönler arasındaki gerilme farklarının sınırlı olması, yapısal denge açısından avantaj sağlamış olabilir. Diğer namlularda ise gerilme profilleri daha karmaşık seyretmiş, yüksek çekme ve basma değerleri genellikle farklı yönlerde dağılmış ve belirgin geçişler gözlenmiştir. Bu durumun, dağılım üzerinde istikrarsızlık yaratabilecek bir etken olduğu düşünülmektedir.

Her ne kadar tüm örneklerde elde edilen dağılım değerleri 1 MOA sınırının üzerinde kalmış olsa da Namlu 2’de elde edilen 1,073 MOA’lık değer hem üretim parametrelerinin hem de kalıntı gerilme profilinin görece dengeli olması durumunda atış doğruluğunun artabileceğine dair bir gösterge sunmaktadır. Bununla birlikte, bu çıkarımın sadece sınırlı sayıda örnekten elde edildiği, bu nedenle genelleme yapılamayacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, bu çalışma, üretim parametreleri ile kalıntı gerilme yapılarının birlikte değerlendirilmesinin atış performansı üzerine etkilerini anlamak için değerli bir ilk adım sunmaktadır. Ancak bu ilişkinin net olarak ortaya konulabilmesi için daha fazla örneklem içeren, istatistiksel temelli ve sistematik deney tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

5.2 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, gerilim giderme işlemine tabi tutulmuş altı farklı namlunun kalıntı gerilme dağılımları ile atış sonrası doğruluk performansları değerlendirilmiştir. Uygulanan gerilim giderme işlemine rağmen bazı yönlerde yüksek çekme gerilmelerinin varlığı tespit edilmiş; bu durumun, grupman değerleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, gerilim kontrolünü artırmaya yönelik ilave üretim adımlarının araştırılması, gelecek çalışmalar için önem arz etmektedir.

Özellikle, honlama işleminin raybalama sonrasında uygulanması önerilmektedir. Honlama, iç yüzeydeki pürüzlülüğün azaltılmasına katkı sağlayarak, merminin namlu içerisinde daha stabil ilerlemesini mümkün kılabilir. Bu işlem aynı zamanda yüzey kusurlarını minimize ederek sürtünmeyi azaltmakta ve böylece hem iç balistik performansa hem de grupman değerlerine olumlu yönde katkı sunabilmektedir. Zhou ve arkadaşları (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, honlama parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve yorulma dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğu; yüzey düzgünlüğü sağlanan namlularda iç basınç dağılımının daha simetrik gerçekleştiği ve bunun da atış doğruluğunu olumlu etkilediği belirtilmiştir.

Bununla birlikte, yiv-set çekme işleminin farklı üretim yöntemleriyle uygulanması, gelecek araştırmalarda değerlendirilebilecek bir diğer konudur. Ayrıca, üretim sürecinde kullanılan kesici takım geometrisi, yağlama tipi, kesme sıvısı özellikleri gibi parametrelerin dağılıma etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Bu parametrelerin kalıntı gerilme oluşumu ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri, atış doğruluğunu dolaylı olarak etkileyebilecek kritik değişkenlerdir.

Son olarak, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarda atıcı kaynaklı değişkenlerin ve çevresel etkilerin minimize edildiği sabit test düzeneklerinin kullanılması önerilmektedir. Bu sayede elde edilen grupman verilerinin, üretim parametreleri ve malzeme özellikleri ile daha doğrudan ve güvenilir şekilde ilişkilendirilmesi mümkün olacaktır.

6. KAYNAKÇA

- Blackmore, H. L. (1990). *Guns and rifles of the world*. Sterling Publishing.
- Bolton-King, R. (2017). Rifling methods of factory fitted 9 mm Luger (9 × 19 mm) pistol barrels: A reference resource. *AFTE Journal*, 49(4), 225–238.
- Carlucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2018). *Ballistics: Theory and design of guns and ammunition* (3rd ed.). CRC Press.
- Chase, K. (2003). *Firearms: A global history to 1700*. Cambridge University Press.
- Demir, M., & Güner, F. (2023). Materials and manufacture processes of assault rifle barrels.
- de Rosset, W. S. (2015). Processing of composite gun tubes with GLEEM and hammer forging. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(10), 1168–1173. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1026352>
- Duan, T., Peng, W., Ding, K., Guo, W., Xu, L., Zhang, L., Li, Y., & Liu, Y. (2019). Long-term field exposure corrosion behavior investigation of 316L stainless steel in the deep sea environment. *Ocean Engineering*, 189, 106405. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106405>
- Ghosh, A., & Mallik, A. (2010). *Manufacturing science*. East-West Press.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing*. Wiley.
- Guillou, L. (2018). *German submachine guns, 1918–1945: Bergmann MP18/I*. Schiffer Publishing.
- Hsieh, P.-Y., Wu, B.-D., & Hung, F.-Y. (2024). 17-4 precipitation-hardening stainless steel: Soft-tough heat treatment mechanism and thermal fatigue characteristics. *Materials*, 17(23), 5851. <https://doi.org/10.3390/ma17235851>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson.
- Kelly, J. (2004). *Gunpowder: Alchemy, bombards, and pyrotechnics: The history of the explosive that changed the world*. Basic Books.

- LaBounty, C. F. (2012). Rifling machines methods.
- Liu, C., Wang, Z., Zhang, G., & Liu, L. (2015). The effect of cutting speed on residual stresses when orthogonal cutting TC4. *EPJ Web of Conferences*, 94, 01035. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401035>
- Liu, L., & Fan, L. (2009). Study of residual stresses in the barrel processed by the radial forging. In 2009 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) (pp. 126–129). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIC.2009.343>
- McGeough, J. A. (1974). Principles of electrochemical machining. Chapman & Hall.
- Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2007). Friction stir welding and processing. ASM International.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014). Residual Stresses and Mitigation Strategies. *Friction Stir Welding and Processing*, 297–326. https://doi:10.1007/978-3-319-07043-8_10
- Pegler, M. (2011). Out of nowhere: A history of the military sniper. Osprey Publishing.
- Peterson, H. L. (1961). A history of firearms.
- Rajurkar, K. P., Sundaram, M. M., & Malshe, A. P. (2013). Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 6, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>
- Walter, J. (2006). Rifles of the world. Krause Publications.
- Withers, P. J., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2001a). Residual stress Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355–365. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>
- Withers, P. J., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2001b). Residual stress Part 2 – Nature and origins. *Materials Science and Technology*, 17(4), 366–375. <https://doi.org/10.1179/026708301101510087>
- Xu, W., & Zhang, J. (2022). Investigation of through thickness residual stress, microstructure and texture in radial forged high strength alloy steel tubes. *Metals*, 12(4), 622. <https://doi.org/10.3390/met12040622>

İnternet Kaynakları

- 1- Absolute Machine Tools. (t.y.). <https://absolutemachine.com/product/precihole-brm-series-broach-rifling/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 2- Bear Creek Arsenal. (2022, 17 Ekim). October BCA Newsletter. <https://www.bearcreekarsenal.com/blog/october-bca-newsletter-2022.html> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 3- CZ-USA. (2023, 24 Mayıs). Inside Cold Hammer Forged Barrels. <https://www.czforthosewhoknow.com/blog/2023/05/24/inside-cold-hammer-forged-barrels/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 4- Ege Gündem. (2025). Özel harekat polislerinden nefes kesen tatbikat <https://www.egegundem.com.tr/haber/14617363/ozel-harekat-polislerinden-nefes-kesen-tatbikat> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 5- Emag. (2025, 1 Nisan). High-performance ECM rifling for perfect rifle and pistol barrels – PI machines from EMAG. <https://www.emag.com/blog/en/high-performance-ecm-rifling-pi-machines-from-emag/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 6- Frankonia. (2025). Davide Pedersoli Vorderlader Gewehr Whitworth. <https://www.frankonia.de/p/davide-pedersoli/vorderlader-gewehr-withworth/192029> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 7- Grey Ops. (2010, Ekim). FLASC Magic: "Milsimming" the BT TM7. <https://www.greyops.net/2010/10/flasc-magic-milsimming-bt-tm7.html> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 8- Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifi. (2025). <https://www.huglu.com.tr/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 9- Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifi. (2025). OVIS G2 AL <https://www.huglu.com.tr/urun/bolt-action-yivli/ovis-g2-al/1818> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 10- Kibler's Longrifles. (2021). Cut Rifling on HAAS TL-2 <https://www.youtube.com/watch?v=K6kHWZSK7Bg> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)

- 11- MacKenzie, D.S. (2023, Ocak). Residual stresses from machining. Gear Solutions Magazine. <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/residual-stresses-from-machining/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 12- Matwest UK Ltd. (t.y.). Design Consultancy. <https://www.matwestukltd.com/design-consultancy/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 13- Milliyet. (2016, 8 Nisan). MPT-76 ile ilgili detaylar ve teknik özellikleri. <https://www.milliyet.com.tr/galeri/mpt-76-ile-ilgili-detaylar-ve-teknik-ozellikleri-2223566> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 14- National Institute of Justice. (t.y.). Hammer Forged. <https://nij.ojp.gov/nij-hosted-online-training-courses/firearms-examiner-training/module-04/hammer-forged> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 15- Sniper's Hide. (2020). How were '03 and Garand barrels rifled? <https://www.snipershide.com/shooting/threads/how-were-03-and-garand-barrels-rifled.6978617/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 16- Snow, J. B. (2020, 26 Ekim). How accurate is your hunting rifle, really? The case for shooting 3 and 5 shot groups. Outdoor Life. <https://www.outdoorlife.com/story/guns/how-accurate-is-my-hunting-rifle-3-or-5-shot-groups/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 17- Telluric Arms. (t.y.). Minute of Angle. <https://telluric.us/minute-of-angle> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 18- UNISIG. (2022, 26 Eylül). Stress Relief For Your Rifle Barrels (and your operations). <https://unisig.com/stress-relief-for-your-rifle-barrels-and-your-operations/> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 19- Vikipedi. (2023). MP 18. https://tr.wikipedia.org/wiki/MP_18 (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 20- Vikipedi. (2023). StG 44. https://tr.wikipedia.org/wiki/StG_44 (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)

- 21- Vikipedi. (2023). Wheellock. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wheellock> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)
- 22- Vikipedi. (2024). Hand cannon. https://en.wikipedia.org/wiki/Hand_cannon (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2025)

