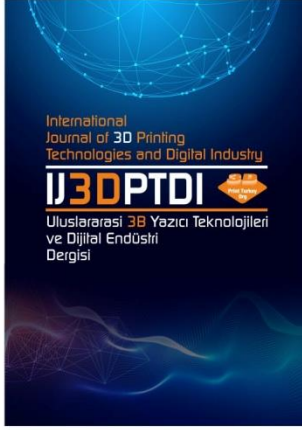




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 [Online]

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

HAFİF SİLAHLARDA YİV-SET SAYISI, HATVE DEĞERİNİN ÇEKİRDEĞİN İLK HIZINA ve DAĞILIMINA ETKİSİ

THE EFFECT OF RIFLING NUMBER AND TWIST RATE
ON THE MUZZLE VELOCITY AND DISPERSION OF
BULLETS IN SMALL ARMS

Yazarlar (Authors): Mesut Çelik *, Mustafa Bozdemir 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çelik M., Bozdemir M., “Hafif Silahlarda Yiv-Set Sayısı, Hatve Değerinin Çekirdeğin İlk Hızına ve Dağılımına Etkisi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(3): 668-680, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1789326

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

HAFİF SİLAHLARDA YİV-SET SAYISI, HATVE DEĞERİNİN ÇEKİRDEĞİN İLK HIZINA ve DAĞILIMINA ETKİSİ

Mesut Çelik^a, Mustafa Bozdemir^b

^aKırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Türkiye

^bKırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü, Türkiye

* Sorumlu Yazar: mst.clk5@gmail.com

(Geliş/Received: 22.09.25; Düzeltilme/Revised: 18.11.25; Kabul/Accepted: 05.12.25)

ÖZ

Hafif silahlar, mühimmat ve namlu tasarımının etkileşimi nedeniyle balistik performans üzerinde doğrudan etkili olan sistemlerdir ve mermi stabilitesi ile isabet doğruluğu, namlu geometrisinin kritik parametrelerine bağlıdır. Bu çalışmada, 7,62×51 mm M118 mühimmatı kullanan yarı otomatik bir tüfek platformunda namlu geometrisinin (yiv-set sayısı ve hatve oranı) mermi hızı, stabilitesi ve atış doğruluğu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Soğuk dövme yöntemiyle üretilmiş altı farklı namlu konfigürasyonu (yiv-set: 4, 5, 6; hatve: 255 mm ve 305 mm; namlu boyu: 508 mm; malzeme: 32CrMoV12-10) üzerinde, her namlu için iki grup ve her grupta beş atış olmak üzere toplam 60 atış gerçekleştirilmiş; mermi ilk hızları kronograf ile ölçülmüş ve atış noktalarının x–y koordinatları kullanılarak grup merkezleri, merkez sapmaları ile MOA cinsinden doğruluk ve dağılım değerleri hesaplanmıştır. Ortalama ilk hızlar 776,50–783,90 m/s aralığında bulunmuş olup, yiv-set sayısı ve hatve oranının ilk çıkış hızına doğrudan ve belirgin bir etkisi gözlenmemiştir; bununla birlikte namlu geometrisi dağılım ve doğruluk üzerinde anlamlı farklılıklar üretmiştir. Özellikle 4 yivli ve 305 mm hatveli konfigürasyon en düşük dağılım (0,256 MOA) ve yüksek doğruluk (0,300 MOA) değerlerini vererek mermi stabilitesini artırırken, 5–6 yivli ve/veya kısa hatveli (255 mm) konfigürasyonlar daha geniş dağılımlar ve zaman zaman doğrulukta düşüşler sergilemiştir; bu sonuçlar, fazla yiv setinin namlu-mermi etkileşiminde sürtünme ve küçük sapmalara yol açabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, hafif silah namlu tasarımında yiv-set ve hatve optimizasyonu mermi dağılımı ve doğruluğu üzerinde kritik bir rol oynamakta olup, bu parametrelerin dikkatli seçimi hem balistik performansın iyileştirilmesine hem de üretim süreçlerine uygulanabilir katkılara işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hafif Silahlar, Yiv-Set, Yiv-Set Açma Metotları, Hatve Oranı, Balistik Performans, Doğruluk ve Dağılım Analizi.

THE EFFECT OF RIFLING NUMBER AND TWIST RATE ON THE MUZZLE VELOCITY AND DISPERSION OF BULLETS IN SMALL ARMS

ABSTRACT

Small arms are systems in which the interaction between ammunition and barrel design directly affects ballistic performance, and projectile stability and hit accuracy depend on critical barrel geometric parameters. In this study, the effects of barrel geometry—specifically the number of rifling lands/grooves and the twist rate—on projectile velocity, stability and shooting accuracy were examined experimentally on a semi-automatic rifle platform using 7.62×51 mm M118 ammunition. Six different barrel configurations manufactured by the cold-forging method (rifling: 4, 5, 6; twist: 255 mm and 305 mm; barrel length: 508 mm; material: 32CrMoV12-10) were tested; for each barrel two groups and five shots per group were fired, yielding a total of 60 shots. Muzzle velocities were measured with a chronograph, and the x–y coordinates of shot impacts were recorded to compute group centers, mean deviations and accuracy and dispersion values expressed in MOA. Mean muzzle velocities were found

to range from 776.50 to 783.90 m/s, and no clear or direct effect of rifling count and twist rate on initial muzzle velocity could be observed; however, barrel geometry produced significant differences in dispersion and accuracy. In particular, the 4-land/groove configuration with a 305 mm twist exhibited the lowest dispersion (0.256 MOA) and highest accuracy (0.300 MOA), while 5–6 land/groove and/or short-twist (255 mm) configurations showed wider dispersions and occasional decreases in accuracy; these findings indicate that a higher rifling count may increase barrel-projectile friction and induce small deviations at shot exit. In conclusion, optimization of rifling count and twist rate in light weapon barrel design plays a critical role in projectile dispersion and accuracy, and careful selection of these parameters can contribute to improved ballistic performance and offer practical benefits for manufacturing processes.

Keywords: Small Arms, Rifling, Methods of Rifling, Twist Rate, Ballistic Performance, Accuracy and Precision Analysis.

1. GİRİŞ

Hafif silahlar, bireysel kullanım için tasarlanmış elde taşınabilir ateşli silahlar olarak tanımlanır ve hem askeri hem de sivil alanlarda tarihsel ve güncel öneme sahiptir. Tabancalar, tüfekler, karabinalar ve makineli tüfekler gibi farklı kategorileri kapsayan bu silahlar, görev profillerine göre değişen operasyonel gereksinimleri karşılayacak biçimde tasarlanır.

Hafif silahların evrimi, metalurji, balistik ve mekanik mühendislik alanlarındaki ilerlemelerle doğrudan ilişkilidir. İlk dönem ateşli silahları olan tüfekler ve fitilli silahlar, nispeten hantal ve yavaş doldurulan sistemlerdi. Bununla birlikte, yiv set (rifling) teknolojisinin yaygınlaşması, kapsül/primer mekanizmalarının gelişimi ve dumansız barut gibi propellantlardaki yenilikler, menzil, isabet oranı ve güvenilirlik açısından belirgin iyileşmeler sağlamıştır. Yiv set uygulamaları merminin stabilitesini ve doğruluğunu artırırken; namlu geometrisi, hatve (twist rate) ve yiv set sayısı merminin ilk hızı ve dağılım karakteristikleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Son yıllarda hem sayısal hem deneysel çalışmalar, namlu geometrisinin (örneğin oluklu/grooved vs. poligonal) iç balistik davranışa etkisini araştırmıştır.

Silva Rivera vd. [1], tarafından yapılan karşılaştırmalı çalışmada, 9×19 mm mühimmatın poligonal ve oluklu namlulara göre ürettiği basınç, hız, gerilme ve deformasyonlar hem sayısal hem de deneysel

olarak incelemiş ve poligonal namluda merminin daha geniş bir alanda deformasyona uğradığı, ancak yiv izinin daha sık kalarak tanımlanmasının zorlaştığını tespit etmişlerdir. Wei vd. [2], sayısal modelleme yoluyla merminin yivlerle etkileşimi sırasında oluşan tork ve gerilme dağılımını analiz ederek hatve değerindeki değişimin mermi stabilitesini doğrudan etkilediğini ortaya koymuşlardır. Shen vd. [3], namlu hasarının mermi-namlu etkileşim süreci üzerindeki etkileri ve namlu hasarının bir makineli tüfek namlusunun hizmet ömrünün sonlanmasına nasıl yol açtığını incelemişlerdir.

Türkiye’de yapılan çalışmalar da iç balistik, dış balistik ve namlu tasarımının dinamik etkileri gibi konularda hem sayısal hem de deneysel yaklaşımlar sunmuştur.

Özgüder vd. [4], uzunluğu ve iç çap değeri bilinen M101 top namlusunun ağırlığını 270 kilogramdan 115.95 kilografa sonlu elamanlar metodu kullanarak hafifletmişlerdir. Hafifletirme sırasında analitik yöntemlerle çözümlenmesi oldukça zor olan namlu cidar kalınlığının patlama sonucu oluşan basınç değerleriyle eksen boyunca hesaplanması ve optimizasyonu hedeflemişler. Balistik değerleri Vallier-Heydenreich yöntemiyle, gerilme değerleri ise Lamé denklemiyle tekrar analiz etmişler, sonuçlarını karşılaştırmışlar ve oluşan farkların sebeplerini tartışmışlardır. Susantez [5], Vallier-Heydenreich metodu kullanarak 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlular için iç balistik parametrelerin (namlu iç basıncı, mermi konumu, hız ve iç balistik zamanı) birbirleriyle

ilişkilerini incelemiştir. Çalışmada MATLAB ortamında geliştirilen modellerle, merminin namlu içerisindeki konumuna bağlı olarak basınç ve hız değişimlerinin ampirik olarak ifade edilebileceği gösterilmiştir. Şahin vd. [6], namluların yiv-set eğrilerinin kararlılık faktörü ve setlerine etki eden tork üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada 20×102 mm M56 HEI mühimmatı için sabit hatveli ve artan hatveli ($n=1,67$) yiv-set eğrileri oluşturulmuş, bu eğriler için namlu içerisindeki basınç-hız-zaman değişimleri Vallier - Heydenreich metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, $n=1,67$ değerindeki artan hatveli eğrinin, setlere etki eden maksimum torku yaklaşık %50 oranında azalttığı tespit edilmiştir; ayrıca namlu boyunun kısaltılması durumunda tork ve statik kararlılık faktöründeki değişimler de karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Özcan vd. [7], çalışmalarında 9x19 mm kalibreye sahip bir tabanca sistemine ait namlu ve mermi geometrileri sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve ateşleme sonrası iç balistik sürece bağlı olarak gelişen termo-mekanik davranışlar sayısal olarak analiz edilmiştir. Deneysel olarak da ölçümler yapılmıştır. Bu iki ölçüm karşılaştırılmıştır. Gezer ve Engin [8], barut tane geometrisinin silah iç balistiğine etkilerini araştırmışlardır. Şehitoğlu ve Şahin [9], ise fişegın küçük silahlara etkilerini araştırmıştır. Akçay ve Yükselen [10], yapmış oldukları çalışmada zamana bağlı namlu ısı transferi ve malzeme davranışını incelemiş, cook off riskini tartışmıştır. Sürmeli vd. [11], yapmış olduğu çalışmada Lapua Ballistics yazılımı vasıtasıyla 3 farklı .308 kalibre fişek markası verileri kullanarak namlu boyu, namlu çapı ve çekirdek ağırlığı giriş parametrelerinin üçer seviyelerinde Taguchi ortogonal tasarımına bağlı 1000m mesafede sanal atışlar yapmıştır. Atış sonunda elde edilen mermi çıkış hızı ve mermi çıkış enerjisi değerleri için Taguchi metodu kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

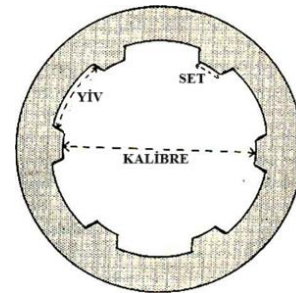
Buna rağmen literatürde, özellikle yiv set sayısı ve hatve değeri gibi parametrelerin merminin ilk hızı ve atış dağılımı (dispersion/grouping) üzerindeki etkilerinin kapsamlı, karşılaştırmalı ve deneysel ağırlıklı bir çalışması hâlâ sınırlıdır.

Mevcut araştırmaların çoğu ya tek bir silah tipiyle sınırlı kalmış ya da sayısal modellemeye odaklanmış, farklı yiv set/hatve kombinasyonlarının aynı mühimmat ve silah platformu altında karşılaştırmalı olarak ele alındığı deneysel veriler oldukça kısıtlıdır. Ayrıca bu şekilde bir deneysel ortamın hazırlanması büyük yetkinlik ve maliyet gerektirmektedir. Bu çalışmanın amacı, hafif silahlarda yiv set sayısı ve hatve değerinin merminin ilk hızı ve dağılımına etkilerini kontrollü deneysel düzenek ve istatistiksel analiz yöntemleriyle inceleyerek literatürdeki bu boşluğu doldurmaktır. Çalışma, iç ve dış balistik kapsamında ölçüm, veri analizi ve sonuçların yorumlanmasını kapsayacak, elde edilen bulgular silah tasarımı ve atış doğruluğunu geliştirme açısından pratik öneriler sunacaktır.

2. YİV-SET VE HATVE

Şekil 1’de namlunun iç yüzeyindeki yiv ve set yapılarının gösterimi mevcuttur. Bu yapılar merminin namludan geçerken belirli bir dönme hareketi kazanmasını sağlar. Bu dönüş hareketi, merminin uçuş sırasında jiroskopik stabilitesini artırarak yörüngesel sapmaları minimize eder. Bu tasarım, yüksek hızla ilerleyen merminin hem doğrusal bir yörüngede kalmasını sağlar hem de hedef üzerinde maksimum isabet oranı elde edilmesine yardımcı olur. Bu nedenle, yiv uygulaması ateşli silahların evriminde çok önemli bir gelişmedir.

Yiv-set yapısı ayrıca mermiye dönüş kazandıran temel namlu içi mekanizmadır ve bu dönüş, hatve oranı (twist rate) adı verilen bir parametre ile tanımlanır. Hatve oranı, merminin namlu içerisinde bir tam tur atması için kat etmesi gereken mesafeyi ifade eder.



Şekil 1. Bir namlunun iç yüzeyindeki kalibre, yiv ve set kavramları.

Namlu içerisindeki yiv-set formunu oluşturmak için birden fazla metot bulunmaktadır;

2.1. Kanca Kesici Yiv-Set Açma Metodu

Yivleri kesmenin en basit yöntemi, "tek kanca kesici" kullanmaktır. Bu yöntemde, tığ kancasına benzeyen sertleştirilmiş bir çelik kesici, namlu çapından biraz daha küçük bir çelik çubuğun oyuğuna yerleştirilir. Kesici namlu boyunca çekilirken namlu sabit bir hızla döndürülerek yivin spirali oluşturulur. Her geçiş yalnızca bir yivi keser, bu yüzden namlunun yeniden konumlandırılması ve gerekli yiv sayısı kadar işlemin tekrarlanması gerekir. Kesici her geçişte çok az talaş kaldırır, bu yüzden "kanca" yüksekliği artırılarak tüm yivler tekrar kesilir; her yiv için bu çekme işlemi 80 adete kadar çıkabilir. Bu yöntem çok zaman almaktadır. Ayrıca kancalar hızla aşındığı için maliyetli bir yöntemdir[12].

2.2. Kazıma Kesici ile Yiv-Set Açma Metodu

Kazıma kesici yöntemi, içine eğimli ve sertleştirilmiş çelik kazıyıcılar yerleştirilmiş bir çubuk kullanır. Bu kazıyıcı sayısı, istenen yiv sayısına karşılık gelir. Sonuç olarak, tüm yivler tek geçişte kesilir; ardından kazıyıcıların yüksekliği artırılarak ek geçişler yapılır. Bu yöntem son derece ince yivler üretir ve en kaliteli silahlarda kullanılır. Kazıma kesici yöntemi, kanca kesici yöntemine çok benzerdir; ancak her yiv için farklı bir kazıyıcı kullanıldığından, yivler arasında temel bir benzerlik bulunmaz[12].

2.3. Broş ile Yiv-Set Açma Metodu

Broş ile yiv açma, modern silah üretiminde en sık başvurulan yiv-set işleme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, ardışık şekilde yerleştirilmiş çok sayıda kesici dişten oluşan uzun bir çubuk (genellikle 20 ila 30 adet kesici disk içeren) takım namlu boyunca geçirilerek işlem gerçekleştirilir. Her bir disk, yiv profilinin sadece küçük bir kısmını işler; ancak her disk, bir öncekine kıyasla hafifçe büyütülmüş kesici kenarlara sahiptir. Bu kademeli yapı sayesinde, her geçişte kesim derinliği artırılarak yiv ve set profili kademeli olarak nihai boyutlarına ulaştırılır.

Son diske ulaşıldığında, yiv-set formu istenen kalibre ve geometrik hassasiyetle tamamlanmış olur. Broş yöntemi hem yüksek boyutsal

tutarlılık sağlaması hem de seri üretime uygunluğu nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.4. Button Yiv-Set Açma Metodu

Button yöntemiyle yiv açma, namlu üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir başka yöntemlerdendir. Bu yöntem, özellikle üretim maliyetlerinin düşük tutulmak istendiği durumlarda, örneğin 5.6mm kalibre ve daha küçük kalibrelerde ayrıca daha ekonomik ateşli silahlarda sıkça uygulanır.

Bu yöntemde, namlu üretiminin başlangıç aşamasında iç çap, nihai istenen ölçüden bir miktar daha dar olarak delinir. Daha sonra, ucunda yiv ve set profilinin tam negatifini taşıyan özel bir sert metal parça yani "button" uzun bir çubuğa sabitlenerek hazırlanır. Bu button, namlu içerisine ya çekilerek ya da itilerek yüksek basınç altında geçirilir. Bu geçiş esnasında, metalin plastik deformasyonu sağlanır ve iç yüzey, istenen yiv-set formuna kalıcı olarak şekillendirilir.

2.5. Dövme ile Yiv-Set Açma Metodu

Button yöntemiyle benzer prensiplere sahip olmakla birlikte, çok daha yüksek hassasiyet ve kalite sunan alternatif bir yiv açma yöntemi de döverek yiv açmadır. Bu yöntemde üretim süreci, namlunun iç çapının, son çap değerinden bir miktar daha geniş delindikten sonra hassas şekilde raybalanması ya da honlanmasıyla başlar. Hazırlanan namlu içerisine, her iki ucu daralan ve yüksek sertlikte çelikten üretilmiş bir mandren (malafa) yerleştirilir. Bu mandren, yiv ve set profilinin tam negatifini taşır.

Yiv formu, mandrenin iç yüzeyde ilerletilmesi sırasında namlunun dıştan dövülmesi veya hidrolik basınçla sıkıştırılması yoluyla şekillendirilir. Böylece iç yüzey, mandrene tam olarak oturur ve yüksek hassasiyetle istenen yiv-set yapısı elde edilir. Bu işlem, yalnızca yiv şeklinin oluşmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda malzeme yapısında soğuk şekillendirme nedeniyle sertlik ve yoğunluk artışı da sağlar. Elde edilen mekanik özellikler, namlunun aşınma direncini ve kullanım ömrünü önemli ölçüde artırır.



Şekil 2. Dövme metoduyla üretilmiş namludan hazne bölümü kesit alınmış görüntü, dövme malafasının kesit içinde görüntüsü, dövmeden çıkmış namlu görüntüsü [13].

2.6. Sıvama ile Yiv-Set Açma Metodu

Başta savunma ve havacılık sektörü olmak üzere 21. Yüzyıl itibarıyla kullanımı ile karşılaşılan sıvama yöntemi, serbest sıvama metodu ile yivli namlu üretiminde kendine yer bulmaktadır. Silindirik ya da konik yapıdaki simetrik parçalarda uygulanan flow forming temelde bir soğuk plastik şekillendirme tekniğidir. Yüksek hassasiyete sahip bu yöntemde parçalar boyları yönlerinde uzatılmaktadır. Mandrelde bulunan yüzey formu, silindirik malzemenin iç yüzeyinde zıt yapısını meydana getirecek olup talaşlı imalat ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır[14].

3. BALİSTİK BİLİMİ

Ateşli silahların temel amacı, hedefe belirli bir doğruluk ve hızla mermi ulaştırarak istenen etkileri sağlamaktır. Bu etkiyi elde etmek için, silahın ateşleme sistemi, namlu yapısı ve kullanılan mühimmatın özellikleri kritik bir rol oynar. Ateşleme işlemi, patlayıcı bir itici madde olan barutun yanarak genleşen gazları serbest bırakmasıyla başlar. Bu gazlar, yüksek basınç oluşturur ve mermiyi namlunun içinden büyük bir hızla iterek hedefe doğru fırlatır. Bu süreçte, merminin doğruluğu ve stabilitesi, özellikle uzun mesafelerde başarılı bir atış için gereklidir.

Konu yüzyıllardır her akademik başarı seviyesindeki insanlar tarafından incelenmiştir. Newton, Lagrange, Bernoulli gibi dünyanın en büyük temel bilimcileri, balistik disiplinlere doğrudan veya dolaylı olarak uygulanan matematik ve mekanik yaklaşımlar öne sürmüşlerdir. Günümüzde balistik bilimi, mühimmatın namlu içindeki hareketini (iç balistik), namlu dışındaki hareketini (dış balistik) ve hedef (terminal) üzerindeki etkisini incelemek üzere üç disipline ayrılmıştır. Bazı durumlarda, ara balistik adı verilen dördüncü bir kategori kullanılmıştır[15].

3.1. İç Balistik

İç balistik tarihi, barutun kullanımıyla başlar. Barutun itici güç olarak ilk ne zaman kullanıldığı kesin olarak belirlenememiş olsa da bu kullanım 14. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Silah, yanan bir itici maddenin açığa çıkardığı ısı, bir merminin faydalı kinetik enerjisine dönüştürüldüğü mekanik bir düzene olarak görülebilir ve temel işlevi, mermileri belirli hedeflere doğru fırlatmaktır[16].

İç balistik, ateşli silahlarda mermi çekirdeğinin namluyu terk edene kadar geçirdiği süreci kapsayan balistik dalıdır. Bu alan; kapsülün ateşlenmesiyle başlayan, barutun yanması, basınç oluşumu, çekirdeğin harekete geçmesi ve namlu içi hareketi gibi aşamaları içerir.

3.2. Dış Balistik

İlkel insan tarafından fırlatılan ilk taş, muhtemelen dış balistiğin en erken örneğidir. Daha uzağa ve daha güçlü fırlatma yeteneği, sapan ve mızrak gibi aletlerin geliştirilmesine yol açtı. Ardından yay ve onun bir uzantısı olan "ballista" geldi. Ballista, büyük okları fırlatmak için kullanılan oldukça karmaşık bir düzeneğe sahip bir silahtı[16].

Üç kuvvet, bir merminin uçuşunu etkiler: Yerçekimi, Hava Direnci (Sürtünme) ve Rüzgâr. Yerçekimi, Dünya üzerindeki tüm cisimleri merkezine doğru çeken sabit bir kuvvettir. Bu kuvvet, mermi namludan çıktığı andan itibaren etkisini göstermeye başlar ve mermiyi sürekli olarak aşağıya doğru çeker. Dolayısıyla, merminin uçuş süresi uzadıkça yerçekimi etkisiyle gerçekleşen düşüş miktarı da artar.

Hava direnci (sürtünme), mermiyi yavaşlatan kuvvettir. Belirli bir merminin yaşadığı sürtünme miktarı, merminin hızı, şekli ve ağırlığına bağlı olarak değişir. Mermi hareket ederken, hava yolundan itilmeli ve bu hava, merminin önünde sıkıştırılır ve merminin yanlarından kayarak dışarı çıkar. Havanın merminin yanlarından arka kısmına doğru hareketi, sürtünme nedeniyle drag (sürtünme kuvveti) oluşturur. Havanın merminin yanlarından arkasına doğru hareket etmesi, vakum oluşturur ve bu da mermiyi daha fazla yavaşlatır. Bu sürtünme, mermi şekli ve tasarımının doğru seçilmesiyle azaltılabilir. Sürtünme kuvvetini çevresel faktörler olan

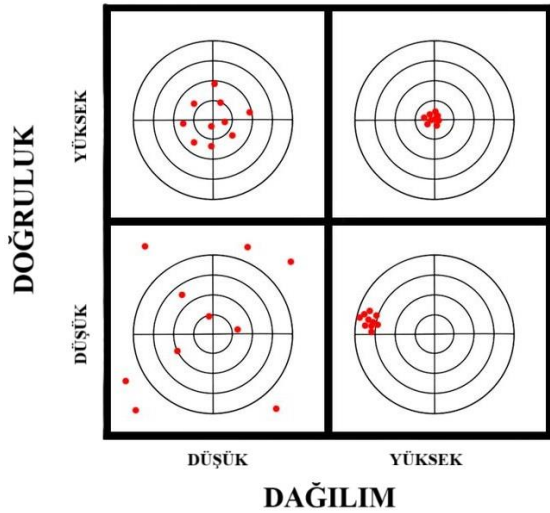
irtifa, sıcaklık ve nem oluşturur. Hava ne kadar yoğun olursa, mermi havadan o kadar zor geçer ve bu da merminin daha fazla sürtünme yaşamasına neden olur[17].

3.3. Hedef Balistiği, Dağılım ve Doğruluk Tanımları

Hedef balistiği, merminin hedef üzerindeki etkilerini konu alırken, modern balistik literatürde bu kavram sıklıkla merminin hedefe ulaşmadaki doğruluk ve dağılım performansını da kapsamaktadır.

Doğruluk, mermilerin hedefin nişan alınan merkezine olan ortalama uzaklıklarını ifade ederken, dağılım, mermilerin hedefte birbirlerine olan göreceli konumlarını, yani atışların grup şeklindeki yoğunluğunu gösterir. Bu iki kavram, özellikle hassasiyet gerektiren askeri ve sportif atış uygulamalarında temel performans kriterleri olarak değerlendirilir.

Dağılımın az olması mermilerin birbirine yakın düştüğü anlamına gelirken, yüksek doğruluk ise bu grubun hedefin merkezine ne kadar yakın olduğunu gösterir. Her iki parametre de namlu tasarımı, mühimmat tipi ve atış koşulları gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Şekil 3’de doğruluk ve dağılım tanımlarının yüksek ve düşük olarak tanımlanması anlatılmıştır.



Şekil 3. Hedef üzerindeki atışların doğruluk ve dağılım bakımından nasıl değerlendirildiği.

4. DENEYSEL TASARIM

İlk olarak çalışmanı yapılacağı mühimmat kalibresi belirlenmiştir; silahlı kuvvetlerde fazlaca tercih edilen 7,62x51 NATO mühimmatı seçilmiştir. Daha sonrasında bu mühimmatı kullanan silahlar incelenmiştir.

Ayrıca kullanıcılardan gelen sorular ve aralarında tartışmaya sebep olan yiv-set sayısı, hatve değerleri de incelenerek deneyde kullanılacak olan namluların değerleri belirlenmiştir. Sonunda 7,62x51mm kalibrede ve 4, 5, 6 yiv-set sayılarında, 305mm ile 255mm hatve oranına sahip toplam 6 adet olacak şekilde namlu çeşidi olmasına karar verilmiştir. Namlu içerisinde bulunan yiv-set formlarının açılma metotları silahın balistik karakteristiğini büyük ölçekte etkilemektedir. Bu yüzden bu formların oluşturulmasında dış etkenlerin en az seviyede olacağı metot olan soğuk dövme metodu seçilmiştir. Bu metot sayesinde namlunun balistik değerlerini etkileyecek dış etkenler minimum seviyede tutulmuştur. Her bir namlu için özel dövme malafası tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu malafanın talaşlı imalatı yapılmıştır. Yapılan deneylerde girdi parametrelerinin değişkenliğinin bir silahın kullanıcısı tarafından sahada en önemli kriterleri arasında bulunan; merminin ilk hızı ve merminin dağılımına ait etkisi için veriler elde edilmiştir. Bu bölümde sırasıyla, deneyde kullanılan malzemeler, deneyin düzeneği, deneysel yöntem bulgular ve değerlendirme verilmiştir.

4.1. Silah Sistemi

Deneysel çalışmalarda, yarı otomatik keskin nişancı tüfeği kullanılmıştır. Silah 7.62×51 mm NATO mühimmatını ateşleyen, gaz piston hareketli ve döner başlı kilitlemeli çalışma mekanizmasına sahiptir.

4.2 Test Namluları

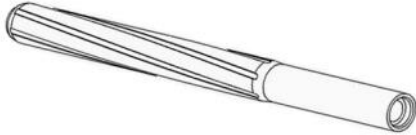
Deneylerde, soğuk dövme metoduyla üretilmiş farklı yiv-set sayısı ve hatve oranlarına sahip toplam 6 adet namlu kullanılmıştır. Namluların bitmiş boyları 508mm’dir. Çizelge1’de hangi namlunun hangi yiv-set, hatve değerine sahip olduğu bilgisi verilmiştir.

Çizelge 1. Test Namlularının Yiv-set ve Hatve değerleri

Namlu No	Yiv-Set Sayısı	Hatve Değeri (mm)
1	4	255
2	5	255
3	5	305
4	6	305
5	6	255
6	4	305

Namlular, sektörde yaygın olarak tercih edilen 32CrMoV12-10 çelik malzemeden üretilmiştir. Ham malzeme uygun boyutlarda kesilmiş ve derin delik delme operasyonu ile dövme malafasının geçeceği çap açılmıştır.

Her bir yiv-set sayısı ve hatve değerinin belli olduğu dövme mandrelleri tasarlanmıştır. Örnek bir dövme mandrel çizimi Şekil 4' de gösterilmiştir.



Şekil 4. Bir dövme mandrelin cad görüntüsü

Tasarlanan malafaların öncelikle kaba talaşlı imalat işlemleri yapılmıştır. Ardından yiv-set formunun ve hatve oranının yapıldığı taşlama operasyonları Şekil 5'de gösterildiği şekilde yapılmıştır.



Şekil 5. Dövme mandrelin taşlanması[18].

4.3 Mühimmat

Tüm testlerde, MKE tarafından üretilen 7.62×51 mm M118 keskin nişancı mühimmatı kullanılmıştır. Bu mühimmat, yüksek hassasiyet ve tutarlılık sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Mühimmatın teknik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. MKE 7.62×51 mm M118 Keskin Nişancı Mühimmatı Özellikleri[19].

Özellik	Değer
Fişek Ağırlığı	~26 gram
Kovan Uzunluğu	51.18 mm
Fişek Uzunluğu	71.12 mm
İlk Hız (23.7 m'de)	784 ± 9 m/s
Maksimum Ortalama Basınç	4450 bar

4.4. Balistik Test Masası

Üniversal mekanizma sistemi ve diğer ekipmanın üzerine bağlandığı ve atışın etkilerine dayanıklı bir masadır. Yüksekliği ve iki yönde açıları ayarlanabilir. Özel aparatlar kullanmak suretiyle bir tüfek veya tabanca da bağlanıp örneğin prototip deneme atışları bunun üzerinde yapılabilir.

4.5. İlk Hız Ölçüm Cihazı

Balistik masada bağlı bulunan silahın yanına portatif olarak kullanılabilen Garmin markanın Xero C1 modeli konarak ölçümler alınmıştır.

Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Garmin xero c1 ilk hız ölçüm cihazı teknik özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm Hız Aralığı	30 m/s – 1.524 m/s (100 – 5.000 fps)
Hassasiyet	±%0,1 (örnek: 850 m/s için ±0,85 m/s)
Ölçüm Teknolojisi	24 GHz Doppler radarı
Boyutlar	77 mm x 60,5 mm x 34,4 mm
Ağırlık (tripodsuz)	105,6 gram
Çalışma Sıcaklığı	-10°C ila +55°C
Pil	Dahili lityum-iyon; yaklaşık 6 saat ya da 2.000 atış kullanım ömrü
Şarj Girişi	USB-C
Dahili Bellek	5.000 atış (50 oturum)

4.6 Deneyin Yapılışı

Yiv-set sayısı ve hatve değerleri belli olan namluları ile tek tek silah kompleksi yapılmıştır. Yapılan silahların öncelikle fonksiyonel testi için 30 adet atış yapılmış ve silah kompleksinde herhangi bir sıkıntı olup olmadığı test edilmiştir.

Fonksiyonel testinde sıkıntı olmadığı teyit edildikten sonra her silah balistik test masasına bağlanarak 25 m'de hedef sıfırlaması yapılmıştır.

Hedef sıfırlaması yapılan silahlar ile 100 m'de bulunan hedef kâğıdı üzerine atışlar yapılmıştır. Her bir namlu için 2 kez dağılım ve her dağılım 5 atış içerecek şekilde dağılım alınmıştır.

Dağılım esnasında silah yanına ilk hız ölçüm cihazı konarak çekirdeklerin hız değerleri kayıt altına alınmıştır.

Her atış numaralandırılarak hedef merkezine x ve y koordinatlarında olan uzaklıkları mm cinsinden ölçülmüştür.

Her grubun merkez koordinatları (1) de verilen hesaplama metodu ile hesaplanmıştır.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ ve } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

Daha sonra her atışın yeni bulunan merkeze olan uzaklıkları hesaplanmıştır;

$$r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Standart sapma, bir veri grubundaki değerlerin ortalamaya (grup merkezine) ne kadar uzakta olduğunu gösterir. Dolayısıyla, her atışın grup merkezine olan uzaklıklarının standart sapması, grubun dağılım ölçüsüdür. Bunun içinde uzaklıkların standart sapması hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Her bir atışın isabet noktası, grup merkezine olan uzaklığı esas alınarak dağılım analizi yapılmıştır. Bu analizde, her atışın grup merkezine olan doğrusal uzaklığı milimetre cinsinden ölçülmüş, ardından bu değerler açısal bir ölçü birimi olan MOA cinsine çevrilmiştir. MOA, nişancılık ve balistik literatüründe doğruluğu ve hassasiyeti tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir birimdir. 1 MOA, 100 metrede yaklaşık 29.1 mm'lik bir kapsama karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, her bir atışın grup merkezine olan uzaklığı,

$$MOA = \frac{\text{mesafe(mm)}}{29.1} \quad (4)$$

formülü ile MOA cinsine çevrilmiştir.

Bu yöntem sayesinde, fiziksel uzaklıklar açısal değerlere dönüştürülerek farklı mesafeler ve sistemler arasında karşılaştırılabilir hale

getirilmiştir. Elde edilen MOA değerleri, ilgili atışın grup içindeki konumunu ve dağılım karakteristiğini daha objektif bir biçimde değerlendirme olanağı sağlamıştır.

Her bir atışın doğruluk değerlendirmesi, atış noktalarının grup merkezi (ortalama etki noktası) ile olan uzaklıklarının hesaplanması esasına dayanmaktadır. Bu işlem için, atış hedefinde ölçülen X ve Y eksenindeki sapma değerleri kullanılarak her bir atışın grup merkezine olan doğrusal uzaklığı (merkez sapması) hesaplanmıştır.

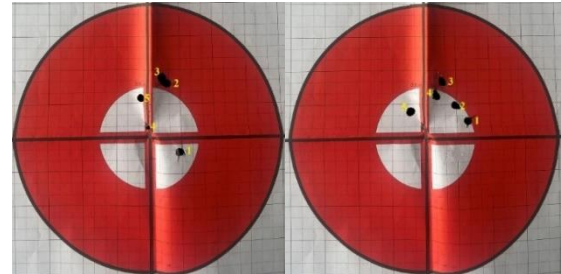
$$D = \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \quad (5)$$

Bu formül, her bir atışın hedef üzerinde grup merkezinden ne kadar saptığını (mm cinsinden) ifade etmektedir. Elde edilen bu doğrusal uzaklık değerleri, doğruluk ölçütü olarak kabul edilmiş ve her atışın grup merkezine olan hassasiyetini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır.

Ayrıca bu doğruluk değerleri, farklı mesafelerle karşılaştırılabilir hale getirmek amacıyla MOA cinsine çevrilmiştir. 100 metre atış mesafesi için 1 MOA $\approx$ 29.1 mm olduğundan, her bir doğruluk değeri aşağıdaki formülle MOA birimine dönüştürülmüştür:

$$MOA_{\text{Doğruluk}} = \frac{\text{Merkez Sapması(mm)}}{29.1} \quad (6)$$

• 1 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 6. 1. Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda), 2. Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

1 nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 4. 1 nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplama sonuçları

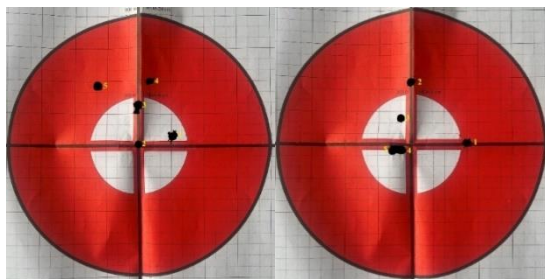
Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	25,2	18	13	0	-7
Y (mm)	-11	45,2	52	10	33
İlk hız (m/s)	777	785	787	781	783
Grup Merkezi $\bar{X}$	9,84				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	25,84				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	39,914	21,009	26,350	18,648	18,299
Dağılım (Std Sapma, mm)	9,018				
Dağılım (MOA)	0,310				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	27,650				
Doğruluk (MOA)	0,950				

1 Nolu namlu ile yapılan 2.Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir,

Çizelge 5. 1 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	37	26	13	8	-20
Y (mm)	12	25	45	30	12
İlk hız (m/s)	780	781	785	783	783
Grup Merkezi $\bar{X}$	12,8				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	24,8				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	27,377	13,202	20,201	7,077	35,209
Dağılım (Std Sapma, mm)	11,148				
Dağılım (MOA)	0,383				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	27,908				
Doğruluk (MOA)	0,959				

• 2 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 7. 1.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda),
2.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

2 Nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 6. 2 nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplama sonuçları

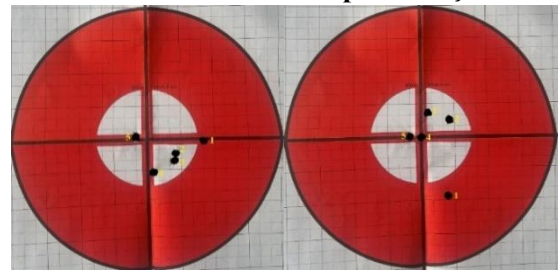
Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	43	0	-8	-7	-16
Y (mm)	0	54	23	-5	-5
İlk hız (m/s)	777	782	780	775	775
Grup Merkezi $\bar{X}$	2,4				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	13,4				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	42,754	40,671	14,153	20,662	26,022
Dağılım (Std Sapma, mm)	12,491				
Dağılım (MOA)	0,429				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	13,613				
Doğruluk (MOA)	0,468				

2 Nolu namlu ile yapılan 2. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir

Çizelge 7. 2 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	31	0	0	9	-33
Y (mm)	8	0	36	57	53
İlk hız (m/s)	781	780	783	784	785
Grup Merkezi $\bar{X}$	1,4				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	30,8				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	37,363	30,832	5,385	27,280	40,941
Dağılım (Std Sapma, mm)	13,915				
Dağılım (MOA)	0,478				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	30,832				
Doğruluk (MOA)	1,060				

• 3 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 8. 1.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda),
2.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

3 Nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 8. 3 nolu namlu ile yapılan 1.grup atışların hesaplama sonuçları

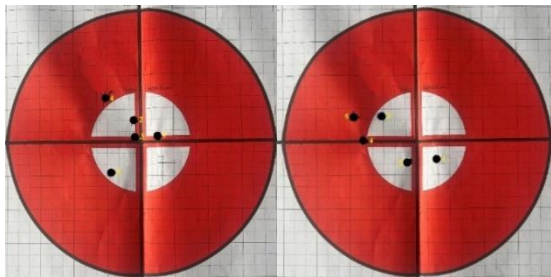
Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	48	23	22	4	-8
Y (mm)	0	-12	-20	-31	3
İlk hız (m/s)	777	773	771	770	780
Grup Merkezi $\bar{X}$	17,8				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	-12				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	32,497	5,200	9,035	23,483	29,844
Dağılım (Std Sapma, mm)	12,293				
Dağılım (MOA)	0,422				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	21,467				
Doğruluk (MOA)	0,738				

3 Nolu namlu ile yapılan 2. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir

Çizelge 9. 3 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	25	21	6	0	-12
Y (mm)	-54	17	21	0	0
İlk hız (m/s)	770	781	783	780	780
Grup Merkezi $\bar{X}$	8				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	-3,2				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	53,569	24,022	24,283	8,616	20,254
Dağılım (Std Sapma, mm)	16,598				
Dağılım (MOA)	0,570				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	8,616				
Doğruluk (MOA)	0,296				

• 4 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 9. 1.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda), 2.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

4 Nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 10. 4 nolu namlu ile yapılan 1.grup atışların hesaplama sonuçları

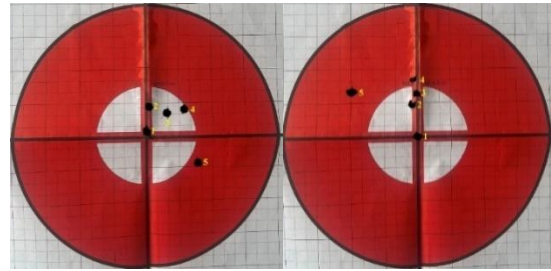
Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	16	-9	-31	-48	-56
Y (mm)	-15	-16	21	0	21
İlk hız (m/s)	777	776	781	780	781
Grup Merkezi $\bar{X}$	-25,6				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	2,2				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	45,016	24,633	19,560	22,508	35,744
Dağılım (Std Sapma, mm)	10,619				
Dağılım (MOA)	0,365				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	25,694				
Doğruluk (MOA)	0,883				

4 Nolu namlu ile yapılan 2. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir

Çizelge 11. 4 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	14	-9	-8	-35	-30
Y (mm)	9	23	7	41	-25
İlk hız (m/s)	781	783	780	785	779
Grup Merkezi $\bar{X}$	-13,6				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	11				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	27,672	12,851	6,882	36,851	39,560
Dağılım (Std Sapma, mm)	14,449				
Dağılım (MOA)	0,497				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	17,492				
Doğruluk (MOA)	0,601				

• 5 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 10. 1.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda), 2.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

5 Nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 12. 5 nolu namlu ile yapılan 1.grup atışların hesaplama sonuçları

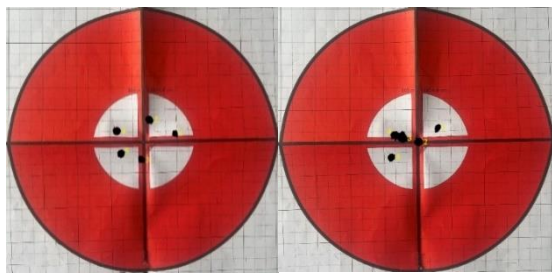
Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	0	-5	0	-5	-60
Y (mm)	0	29	40	52	40
İlk hız (m/s)	776	777	778	780	779
Grup Merkezi $\bar{X}$	-14				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	32,2				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	35,112	9,552	16,026	21,749	46,657
Dağılım (Std Sapma, mm)	14,980				
Dağılım (MOA)	0,515				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	35,112				
Doğruluk (MOA)	1,207				

5 Nolu namlu ile yapılan 2. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir

Çizelge 13. 5 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	0	3	17	34	46
Y (mm)	10	32	27	30	-20
İlk hız (m/s)	779	782	778	781	775
Grup Merkezi $\bar{X}$	20				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	15,8				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	20,824	23,483	11,595	19,941	44,245
Dağılım (Std Sapma, mm)	12,151				
Dağılım (MOA)	0,418				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	25,488				
Doğruluk (MOA)	0,876				

• 6 Nolu Namlu ile Yapılan Atışlar



Şekil 11. 1.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (solda), 2.Gruba ait hedef kâğıdı görüntüsü (sağda)

6 Nolu namlu ile yapılan 1. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir.

Çizelge 14. 6 nolu namlu ile yapılan 1.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	18	0	-15	-22	-25
Y (mm)	14	0	5	7	-15
İlk hız (m/s)	788	784	782	785	779
Grup Merkezi $\bar{X}$	-8,8				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	2,2				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	29,283	9,071	6,803	14,046	23,628
Dağılım (Std Sapma, mm)	9,610				
Dağılım (MOA)	0,330				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	9,071				
Doğruluk (MOA)	0,312				

6 Nolu namlu ile yapılan 2. Grup atışların hesaplamaları aşağıdaki şekildedir

Çizelge 15. 6 nolu namlu ile yapılan 2.grup atışların hesaplama sonuçları

Atış No	1	2	3	4	5
X (mm)	24	2	-8	-31	-26
Y (mm)	10	20	-17	12	-10
İlk hız (m/s)	784	788	780	787	782
Grup Merkezi $\bar{X}$	-7,8				
Grup Merkezi $\bar{Y}$	3				
Merkezden Uzaklık (r, mm)	32,561	19,622	20,001	24,885	22,366
Dağılım (Std Sapma, mm)	5,288				
Dağılım (MOA)	0,182				
Doğruluk (Merkez Sapması, mm)	8,357				
Doğruluk (MOA)	0,287				

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı yiv-set sayılarına ve hatve uzunluklarına sahip toplam altı namlu üzerinde yürütülen dağılım ve doğruluk ölçümleri neticesinde elde edilen veriler ışığında balistik performans analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler, MOA (Minute of Angle) cinsinden değerlendirildiğinde hem dağılım hem de doğruluk bakımından namlular arasında anlamlı farklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkların temel nedeni olarak namlu iç geometrisinin (yiv-set sayısı ve hatve uzunluğu) çekirdek üzerindeki dinamik etkileri gösterilebilir.

Namlu başına iki dağılım atışı yapılmış ve her birinin MOA cinsinden hem dağılım hem doğruluk değerleri ölçülmüştür. Bu verilerin ortalamaları çizelge 16'da verilmiştir.

Çizelge 16. Tüm namluların test sonuçlarının ortalamaları

Namlu No	Yiv-Set	Hatve (mm)	Ort. Dağılım (MOA)	Ort. Doğruluk (MOA)	Ortalama İlk Hız (m/s)
1	4	255	0,347	0,955	782,50
2	5	255	0,454	0,764	780,20
3	5	305	0,496	0,517	776,50
4	6	305	0,431	0,742	780,30
5	6	255	0,467	1,042	778,50
6	4	305	0,256	0,300	783,90

Ana bulgular ve tartışma;

Hatve uzunluğunun olumlu etkisi: Aynı yiv-set sayısı içinde 305 mm hatveye geçen namlular genel olarak daha iyi doğruluk sergilemiştir. Özellikle 4 yivli namlular için 255 → 305 mm geçişi doğrulukta (0,955 → 0,300 MOA) ve dağılımda (0,347 → 0,256 MOA) belirgin iyileşme sağlamıştır. Bu gözlem, hatve uzunluğunun mermiye uygulanan dönmenin sürekliliğini ve eksenel stabilitesini iyileştirerek grup çaplarının küçültülebileceğini göstermektedir.

Yiv-set sayısının etkileşimi: Yiv sayısının tek başına artması her zaman performans iyileşmesi getirmemiştir. Örneğin, 6 yiv — 255 mm kombinasyonu (Namlu 5) en kötü doğruluk değerini (1,042 MOA) göstermiştir. Bu durum, fazla yiv-setin mermi-namlu temas yüzeyini ve sürtünmeyi artırarak çıkışta küçük sapmalara ve enerji kayıplarına neden olabileceği göstermektedir. Öte yandan 6 yiv — 305 mm (Namlu 4) kısa hatve eşdeğerine göre daha iyi performans verir görünmekte; dolayısıyla yiv sayısı × hatve etkileşimi belirleyici rol oynamaktadır.

İlk hız ilişkisi: Elde edilen veriler incelendiğinde ortalama ilk hız değerlerinin 776,5 m/s ile 783,9 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Bu fark yaklaşık %1'in altında olup, istatistiksel açıdan anlamlı bir değişim olarak değerlendirilemez. Ancak, yiv-set sayısı ve hatve uzunluğu değişiminin ilk hız üzerindeki eğilimini yorumlamak mümkündür. Genel olarak, daha az yiv-set sayısına sahip namluların (4 yivli) ortalama çıkış hızlarının, 5 ve 6 yivli namlulara kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, 4 yivli ve 305 mm hatveli namluda (Namlu 6) 783,9 m/s'lik en yüksek ortalama hız ölçülmüştür. Bu

sonuç, yiv sayısının artmasıyla birlikte mermi-namlu temas yüzeyinin büyümesi ve buna bağlı sürtünmenin artması nedeniyle çıkış hızında küçük düşüşler yaşanabileceği göstermiştir. Hatve uzunluğu açısından bakıldığında, kısa hatve (255 mm) ile uzun hatve (305 mm) arasında belirgin bir hız farkı gözlemlenmemiştir. Ancak uzun hatveli namlular (özellikle 4 yivli) ortalama olarak daha yüksek hız eğilimi göstermiştir. Bu durum, uzun hatvede merminin dönme hızının kademeli olarak kazanılması sayesinde sürtünme torkunun daha dengeli dağılması ve gaz basıncının daha etkin kullanılması ile açıklanabilir.

Elde edilen eğilimler, uygun olmayan yiv/hatve kombinasyonlarının mermi stabilitesini bozup isabeti olumsuz etkileyebileceğini raporlayan önceki çalışmaları desteklemektedir. Ayrıca hatve dengesinin (twist stability) mermi eksenel stabilitesine katkısı bu deneysel verilerde açıkça gözlemlenmiştir.

Genel olarak, elde edilen veriler, hafif silahlarda yiv-set sayısı ve hatve uzunluğunun optimizasyonunun mermi dağılımı, doğruluk ve atış performansı üzerinde kritik rol oynadığını ve namlu tasarımının balistik performansın iyileştirilmesinde temel belirleyici faktörlerden biri olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde ve alana çarpan etkisi olacak araştırma yönleri şu şekilde olabilir;

Mühimmat çeşitliliği ve mesafe taraması: Farklı uç tipleri, kütleler ve toleranslara sahip mühimmatlarla, ayrıca 100 m'in ötesinde (ör. 300 m, 600 m) dış balistik testleri yapılmalı; böylece iç balistik bulguların pratik menzildeki yansımaları görülebilir.

Yüzey/termal analizler: Namlu iç yüzey profilometrisi, kaplama uygulamaları ve ısınma/aşınma etkilerinin performansa etkisi deneysel olarak ölçülmeli. Bu veriler sürtünme-tork modellerinin geliştirilmesine katkı sağlar.

Hibrit sayısal-deneysel yaklaşımlar: FEA/CFD modellemeleri ile mermi-namlu etkileşimi

sayısal olarak modellenip deneysel sonuçlarla doğrulanmalı; optimizasyon algoritmalarıyla en uygun yiv/hatve kombinasyonları belirlenebilir.

Makine öğrenmesi ve veri tabanları: Deneysel ve simülasyon verileri bir araya getirilerek makine öğrenmesi tabanlı öngörücü modeller (surrogate models) geliştirilebilir; bu, tasarım uzayının hızlı taranmasını mümkün kılar.

Malzeme ve üretim trendleri: Additive manufacturing ile özelleştirilmiş yiv profilleri, yeni kaplama teknolojileri ve kompozit namlu çözümleri araştırılarak hem performans hem de namlu ömrü optimizasyonu sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. U. Rivera, L. Aviles, A. Gonzalez, P. Meza, W. Angel, "Internal ballistics of polygonal and grooved barrels: A comparative study", Science Progress, Vol. 104, Issue 2, Pages 1-23, 2021.
2. Z. Wei, Y. Cheng, Z. Wang and Y. Lin, "Simulation Study on the Impact Response of Barrels with Different Rifling Profiles during Bullet Engraving", Modelling and Simulation in Engineering, Vol. 2022, Issue 1, Pages 1-18, 2022.
3. C. Shen, K. Zhou, Y. Lu, J. Li, "Modeling and simulation of bullet-barrel interaction process for the damaged gun barrel", Defence Technology, Vol. 15, Issue 6, Pages 972-986, 2019.
4. O. Özgüder, M. Özbay, H. Adin, "Namlu İç Balistik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi", DÜMF MD, Cilt 8, Sayı 3, Sayfa 609–620, 2017.
5. Ç. Susantez, "Vallier-Heydenreich Metodu ile Silahların Namlu İç Balistiğinin İncelenmesi", Savunma Bilimleri Dergisi, Cilt 19/1, Sayı 37, Sayfa 73–94, 2020.
6. Ç. Şahin, A. Özdemir, "Namlularda Değişken Yiv-Set Eğrisinin Kararlılık Faktörü ve Set Torkuna Etkisi", Manufacturing Technologies and Applications, Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 1–13, 2021.
7. B. Özcan, M. S. Seyis, U. Şeker, A. Kurt, "Analysis of the Internal Ballistic Process of a 9x19 mm Pistol Barrel Using the Finite Element Method and Experimental Validation". Enginoscope, Vol. 1, Issue 2, Pages 116-135, 2025.
8. H. A. Gezer, T. Engin, "The inspection of effect of propellant granule geometry on gun interior ballistics", Sakarya University Journal of Science, Vol. 20, Issue 2, Pages 251–257, 2016.
9. H. O. Şehitoğlu, Ü. M. Şahin, "Fişegin Gelişiminin Küçük Silahlara ve Harekât Ortamına Çoklu Etkisi", Savunma ve Güvenlik Araştırmaları Dergisi, Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 95-116, 2025.
10. M. Akçay, M. A. Yükselen, "Namlu Malzemesi Isıl Karakteristikleri Homojen Olmayan Silah Namlularının İç Balistik Çevrim Sırasında Zamana Bağlı Isıl İncelenmesi", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 34, Sayı 2, Sayfa 75-81, 2014.
11. D. Sürmeli, S. Neşeli, "Mermi Namlu Çıkış Hızı ve Enerjisini Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu", Journal of Selcuk-Technic, Cilt 19, Sayı 3, Sayfa 156-169, 2020.
12. Heard, B. J., "Handbook of firearms and ballistics 2nd ed.", Pages 158-164, Wiley-Blackwell, New Jersey, 2008.
13. "Barrel rifling twist rate", <https://www.guns.com/news/2019/10/04/barrel-rifling-twist-rate>, Temmuz 15, 2025.
14. Alkılınç, Ö., "Namlularda atış ömrünü etkileyen sert krom ve oksidasyon kaplama parametrelerinin karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2021.
15. Carlucci, D. E. and Jacobson, S. S., "Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition", 3rd ed., Pages 3-5, CRC Press, Boca Raton, 2018.
16. Farrar, C. L. and Leeming, D. W., "Military Ballistics: A Basic Manual", Pages 1-5, Brassey's Publishers Ltd, Oxford, 1983.
17. Das, P. K., Das, L. P., and Das, D. P., "Science and Engineering of Small Arms", Pages 57–61, CRC Press, Oxon, 2022.
18. Zivkovic, S., "Profiling of mandrel for rotary forging", Journal of Production Engineering, Vol. 17, Issue 1, Pages 59–62, 2014.
19. MKE, "7.62 mm x 51 M118 Fişek", <https://www.mke.gov.tr/Urunler/762-mm-x-51-M118-Fisek/158>, Mayıs 21, 2025.