

# Adli Fizik Eğitiminde Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Kullanımı

Orkun Eruygun<sup>1</sup>, Aylin Yalçın Sarıbey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Üsküdar Üniversitesi Bağımlılık ve Adli Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Üsküdar Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Adli Bilimler Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

## Öz

### Adli Fizik Eğitiminde Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Kullanımı

**Amaç:** Üç boyutlu görselleştirme teknolojisi kullanılarak temel balistik eğitimi için balistik sarkaç deneyine yönelik bir sanal gerçeklik aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

**Yöntem:** Sanal ortamda deney geliştirme süreci; (i) bilimsel hazırlık süreci, (ii) grafik tasarım ve 3D modelleme süreci ve (iii) yazılım süreci olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildi. Mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızını hesaplamayı amaçlayan “Balistik Sarkaç Deneyi”, 7 farklı mühimmat seçeneği ile kullanıcıların deney başlangıç parametrelerini değiştirerek ölçüm ve hesaplama yapmalarına imkân verecek şekilde geliştirildi.

**Bulgular:** Deney yazılımı 9x19 Parabellum mühimmat seçilerek çalıştırıldı ve test entegrasyonları gerçekleştirildi. Deneyde 5.7 gram kütleli mermi çekirdeği dönme noktasına 1.3 metre mesafede 4 kg kütleli sarkaç takozuna merkezi tam esnek çarpışma yaparak saplandı. Açılal momentumun ihmâl edilerek sadece lineer momentum hesaba katıldığında mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızı mühimmatın balistik performansını gösteren referans değerden (597 m/s) 55 m/s’lik fark ile 652 m/s olarak hesaplandı.

**Sonuç:** Sanal gerçeklik teknolojisiyle 3 boyutlu modelleme ve bilimsel algoritmalara dayalı olarak her öğrencinin kendi parametre değişikliği ile farklı sonuçlar elde edebileceği dinamik bir deney ortamı oluşturuldu. Bu sayede, güvenlik gerekçeleri, silah kullanıma yönelik resmi prosedür ve izin mevzuatı, silah temini, yeterli sayı ve donanımda fiziki laboratuvar sayısı gibi konularda yaşanan zorluklara alternatif bir çözüm sunuldu.

**Anahtar Kelimeler:** Adli balistik, adli bilimler, balistik sarkaç, sanal gerçeklik

**Nasıl Atıf Yapmalı:** Eruygun O, Yalçın Sarıbey A. Adli Fizik Eğitiminde Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Kullanımı. Adli Tıp Bülteni. 2025;30(1):30-37. <https://doi.org/10.17986/bml.1730>

**Yazışma Adresi:** Doktora öğrencisi, Orkun Eruygun, Üsküdar Üniversitesi Bağımlılık ve Adli Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

**Email:** [temelorkun.eruygun@st.uskudar.edu.tr](mailto:temelorkun.eruygun@st.uskudar.edu.tr)

**ORCID iD:** 0009-0007-6952-547X

**Geliş:** 14 Ağs 2024

**Kabul:** 04 Mar 2025

**Abstract****Using Virtual Reality in Forensic Physics Education**

**Objective:** This study aimed to develop a virtual reality tool using 3D visualization technology for ballistic pendulum experiment to be used in basic ballistics education.

**Methods:** The virtual experiment development process was carried out in three stages; (i) scientific preparation, (ii) graphic design and 3D modeling and (iii) software development. The "Ballistic Pendulum Experiment", which aims to determine the exit velocity of the bullet core from the barrel, was developed to allow users to perform measurements and calculations by changing the initial parameters of the experiment with 7 different projectile options.

**Results:** The software was run by selecting 9x19 Parabellum projectile and test integrations were performed. In the experiment, a 5.7 g bullet core was lodged into a 4 kg pendulum block at a distance of 1.3 meters from the pivot point by making a central fully flexible collision. Neglecting angular momentum and considering only linear momentum, the exit velocity of the bullet from the barrel was calculated as 652 m/s, a difference of 55 m/s from the reference value indicating the ballistic performance of the projectile (597 m/s).

**Conclusion:** A dynamic experimental environment was developed with VR technology, based on 3D models and scientific algorithms, where each student can obtain different results with their own parameter changes. In this way, an alternative solution was offered to the difficulties encountered in issues such as security reasons, official procedures and permission legislation for the use of weapons, weapon supply, and the lack of physical laboratories with sufficient number and equipment.

**Keywords:** Forensic ballistics, forensic sciences, ballistic pendulum, virtual reality

**GİRİŞ**

Adli vakaların başarıyla aydınlatılması, büyük ölçüde adli makamlar tarafından toplanan bilgilere, eksiksiz bir olay yeri incelemesine ve toplanan delillerin çağdaş yöntem ve tekniklerle analizine bağlıdır. Bu aşamaların herhangi birinde yapılan dikkatsizlik veya hata, vakanın yanlış yorumlanmasına, yasal mercilerin yanlış yönlendirilmesine, delillerin kaybolmasına ya da delil yetersizliği nedeniyle davanın kapatılmasına yol açabilmektedir (1). Bu nedenle, alanında iyi yetişmiş insan gücü, adli soruşturma ve davaların sağlıklı ilerlemesi açısından büyük önem taşımaktadır.

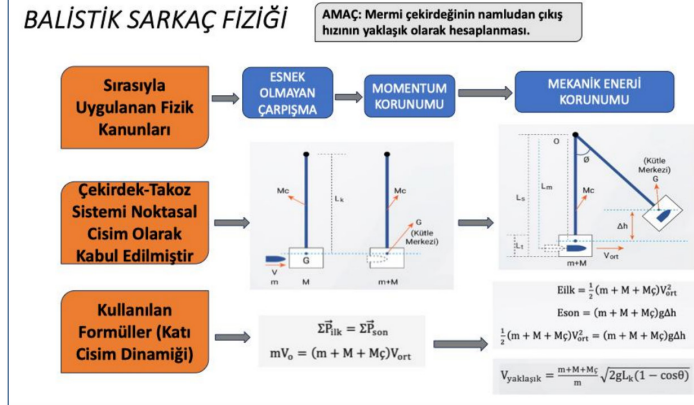
Adli bilimlerde bilimsel bilgi ve yöntem, adli olay ve olguları etkili bir şekilde ele almak için birlikte kullanılır (2). Diğer bir ifadeyle, adli bilimler, teorik bilgi yanında uygun yöntem ve teknikleri içeren uygulamalı yaklaşımların kullanımını gerektirir. Bu nedenle, başarılı adli bilimcilerin yetiştirilmesinde gerekli beceri ve yetkinliklerin kazandırılması amacıyla yürütülen uygulamalı eğitim kritik önem taşımaktadır. Buna karşın, adli bilimlerde uygulamalı eğitim çeşitli zorluklar barındırır (3). Birçok adli bilim tekniği, ateşli silahların, biyolojik numunelerin, toksik kimyasalların analizi gibi güvenlik riski yüksek süreçleri içerir. Bununla birlikte, son teknoloji ekipmanlara sahip adli bilim laboratuvarlarının kurulması ve bakımı oldukça yüksek maliyet gerektirir (4). Yaşanan bu zorluklar öğrencilerin aldıkları uygulamalı eğitim kalitesini etkileyebilmektedir. Uygulamalı eğitimde karşılaşılan güvenlik kaygıları, etik sorunlar, ekipman eksikliği, eğitim faaliyetleri için zaman ve kaynak kısıtlamaları gibi zorluklarla başa çıkma konusunda sanal gerçeklik (VR) teknolojisi önemli fırsatlar taşımaktadır (4-6).

VR teknolojisinin adli bilimler eğitimine entegrasyonu, öğrenme çıktılarına ulaşılmasında ve pratik beceri

geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. VR teknolojisi, adli bilimler öğrencilerinin olay yeri, adli soruşturma ve laboratuvar süreçlerini gerçekçi simülasyonlarla deneyimlemesine olanak tanır (4). Böylece, öğrencilerin güvenlik riskleri ve kısıtlamalar olmadan olay yerini keşfetmeleri, delillerle etkileşime girmeleri ve adli analizler yapmaları mümkün hale gelir. Diğer yandan VR teknolojisi, suç mahallerini etkileşimli bir şekilde simüle ederek fotoğraf ve video gibi görüntüleme tekniklerinin sınırlıklarının üstesinden gelebilmektedir (7). Bilgisayar tabanlı simülasyonlar (benzetim programları) adli bilimlerde genellikle olay yeri canlandırması üzerine kurulu olup olayların gerçekleşme sırasındaki fizik yasalarına dayalı 3 boyutlu simülasyonlar VR teknolojisinin gelişimiyle birlikte önem kazanmıştır. Örneğin, Roger Williams Üniversitesi'nde, fizik yasalarına dayalı VR teknolojisi kullanarak olay canlandırma simülasyon laboratuvarı kurulmuştur (8).

Balistik bilimi, ateşli silahların ve mermilerin benzersiz özelliklerini incelerken, adli balistik, soruşturma ve kimlik tespiti amacıyla suçun işlenmesinde kullanılan ateşli silahların ve mühimmatın sistematik olarak incelenmesidir (9, 10). Adli balistik, ateşleme iğnesi, namlu kapağı ön yüzü, kovan atma tırnağı ve namlu içindeki yiv dahil olmak üzere ateşli silahın çeşitli bileşenleri tarafından ateşlenen mermiler ve fişek kovanları üzerinde bırakılan mikroskobik çizgileri, izleri ve işaretleri analiz etmeye dayanır. Bu işaretlerin parmak izi gibi benzersiz ve tekrarlanabilir olması nedeniyle atış yapan silahı belirlemek mümkün hale gelmektedir (9, 11). Balistik bilimi atış yapılan bir silahın özelliklerini tanımlamakla birlikte, mühimmat olarak kullanılan mermi çekirdeğinin hareketiyle ilgili iç, dış ve hedef balistik olarak üç aşamalı bir sürecin fiziğini de açıklar. Balistik biliminde bu sürece açıklık getiren fizik kanunları balistik sarkaç deneyinin teorisini oluşturur.

Bu anlamda balistik sarkaç deneyi balistik biliminin geneline kapsayan çatı bir öğretilerdir. Bu deneyde mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızını tespit etmek üzere balistik sarkaç düzeneği kullanılarak mermi çekirdeği kendi kütlelerine göre çok büyük olan hedef bir takozla saplanır. Hedef takoz sapının diğer ucu yatay ekseninde rahatça dönebilen bir menteşeye bağlıdır. Böylelikle takoz ve mermi çekirdeği sistemi bir miktar döner. Enerjinin ve momentumun korunumu yasalarından yararlanarak çekirdeğin takozla saplanma hızı hesaplanır (Şekil 1).



Şekil 1. Balistik sarkaç deneyi düzeneği

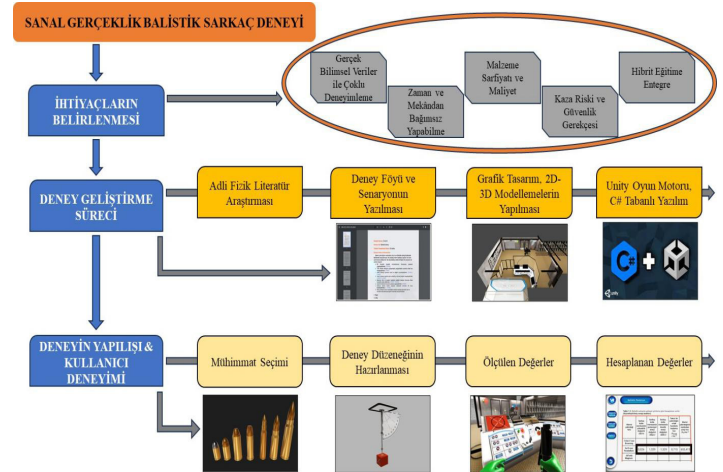
Adli fizik açısından balistik sarkaç deneyi; mermi çekirdeğinin kütlesi, ilk hızı ve atış mesafesi ile insan vücudunda oluşturduğu tahrip etkisi arasında ilişki kurabilmeye imkân vermesi yönüyle oldukça önemlidir. Bu ilişki bilgisi kullanılarak çekirdeğin kinetik enerji korunumundan yola çıkıp olayın hangi silahla nasıl gerçekleştirildiği ve nihayetinde orijin tespitinde bulunulabilir. Bir mermi çekirdeğinin namluyu terk etme hızını hesaplayarak başlayan süreç, kat ettiği mesafeye göre hızında meydana gelen azalmanın miktarı ve çarpma anında kalan kinetik enerjisiyle orantılı olarak hedefte oluşan hasarın belirlenmesiyle tamamlanır. Bir ateşli silah olayında bir birinin devamı olan mermi çekirdeğinin ilk hızı bilgisi kullanılarak atış mesafesi ve hedef üzerindeki tahribat göz önünde bulundurulduğunda bu olay için çok daha doğru değerlendirme imkanı sağlanacaktır. Bu süreçte sebep olabilecek özellikteki silah çeşitlerinin tahmini ve olay yeri bilgilerinin değerlendirilmesi ateşli silahın neden ateşlendiği konusunda ön fikre ulaşılmasına yardımcı olacaktır. Gerçek mühimmat kullanarak gerçekleştirilen balistik sarkaç deneyine adli bilimler eğitiminde güvenlik riskleri, ekipman ve malzeme eksiklikleri gibi nedenlerle çoğu zaman yer verilememektedir. Buna karşılık, VR teknolojisi balistik incelemelerinde bir araç olarak kullanılabilir. Nitekim Guarnera ve ark. (9) çalışmalarında, adli balistik analiz ve karşılaştırma için VR teknolojisini kullanarak yeni bir 3D grafik aracı geliştirmiştir. Araştırma sonucunda geliştirilen aracın sürükleyici görselleştirme, doğal etkileşim ve çalışma

alanının ayarlanmasında daha fazla esneklik gibi faydaları olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Literatüre bakıldığında VR teknolojisinin adli bilim eğitiminde kullanımını ele alan sınırlı sayıda çalışma yer aldığı görülmektedir (5; Khalilia, Gombar, Palkova vd., 2022; 4). Cardwell ve ark. (5) çalışmalarında VR teknolojisini kullanarak adli bilimler öğrencilerine olay yeri inceleme tekniklerini öğretmeyi amaçlamıştır. Araştırma sonucunda VR teknolojilerinin, öğrencilere etkileşimli öğrenme deneyimleri sunarak geleneksel uygulamalarda yaşanan kaynak ve ulaşım sorunlarının üstesinden gelebildiğini göstermiştir. Diğer bir çalışmada Khalilia ve ark. (12) olay yeri inceleme öğreniminde VR teknolojisi ile modern öğrenme stratejilerini ve etkinliklerini uygulamayı ve incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmanın sonuçları, VR teknolojisinin, olay yeri inceleme öğreniminde modern öğrenme stratejilerini ve becerilerini uygulamak için yararlı bir araç olduğunu göstermiştir. Diğer yandan literatürde balistik sarkaç deneyinin 3 boyutlu olarak VR teknolojisiyle gerçekleştirilmesini ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada adli bilimler eğitimi için VR teknolojisi kullanılarak balistik sarkaç deneyine yönelik bir eğitim aracı geliştirilmesi amaçlanmıştır.

## YÖNTEM

Adli bilimler eğitiminde; güvenlik gerekçeleri, silah kullanıma yönelik resmi gerekçeler ve izin mevzuatı, silah temini, kullanılan mühimmat maliyeti, yeterli sayı ve donanımda fiziki laboratuvar yeterliliği gibi konularda yaşanan zorluklara çözüm sağlamak amacıyla “Balistik Sarkaç” deneyi VR teknolojisi kullanılarak geliştirildi. Sanal ortamda deney geliştirme süreci; (i) bilimsel hazırlık süreci, (ii) grafik tasarım ve 3D modelleme süreci ve (iii) yazılım süreci olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildi. İzlenen aşamaları gösteren akış şeması Şekil 2’de verildi.



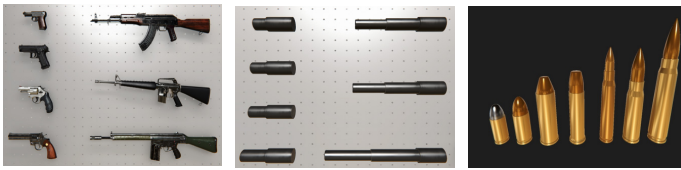
Şekil 2. VR balistik sarkaç deneyi geliştirme süreci

### Bilimsel Hazırlık Süreci

Bilimsel hazırlık sürecinde ulusal ve uluslararası adli bilimler programları incelenerek fizikî laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi çeşitli zorluklar içeren deneyler irdelendi. Ön çalışmalar sonucunda sanal ortamda yapılmasının avantajları nedeniyle adli fizik eğitiminde önemli bir yere sahip olan ve “Balistik Sarkaç Deneyi” olarak isimlendirilen deneyin VR teknolojisiyle geliştirilmesine karar verildi. Deneyin amacı, VR teknolojisiyle balistik sarkaç düzeneği kullanarak mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızını belirlemektir. Adli bilimler programlarının öğrenme çıktıları ve ilgili literatür taraması sonucunda adli fizik açısından öğrenme kazanımları oluşturuldu. Deneyin amaç ve kazanımlarına uygun olarak deneyin içeriği, teorik altyapısı, deney yapılış senaryosu, kullanılacak araç-gereçler belirlenerek öğrencilere yönelik deney föyü hazırlandı. Bu aşamada adli bilimler, fizik, bilişim ve eğitim bilimleri alanlarından uzman görüşleri alınarak gerekli revizyonlar gerçekleştirildi.

Deneyin yapılışında kullanılacak fizik formülleri belirlenerek analitik ve nümerik yaklaşımlara göre Microsoft Excel programında düzenlendi, yazılım sürecine hazır hale getirildi. Deneyin yapılış senaryosu kurgulanarak senaryoya uygun şekilde deneyde kullanılacak araç-gereç listesi belirlendi ve 2D-3D olarak modellenmek üzere araç-gereç örnek görselleri dosyası oluşturuldu. İç ve dış mekân sahne gereksinimleri belirlenerek 3D modellenmek üzere örnek mekân görsel dosyası hazırlandı. Bunun yanında, bilimsel hazırlık sürecinde dinamik modellerin çalışma mekanizmasını anlatan yazılım destek dosyaları, formül simülasyonları, deney sırasında kullanıcının ölçümlerini ve hesapladığı değerleri kaydedeceği veri tabloları oluşturuldu.

### Grafik Tasarım ve 3D Modelleme Süreci



a. Silahlar

b. Namlular

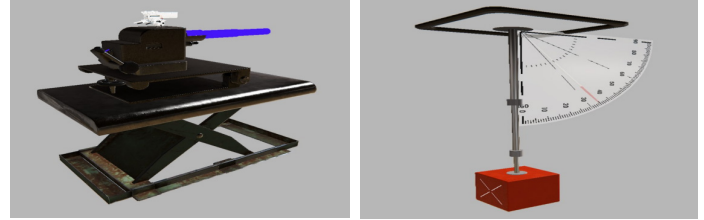
c. Mermiler

Şekil 3. Deneyde kullanılan mühimmat modelleri

Sahne içinde yer alacak 2D grafik tasarımlar Adobe Illustrator, Adobe Photoshop kullanılarak hazırlandı, kullanıcıyla yazılım arasında iletişimi sağlayan arayüz tasarımlar (UI) 2D olarak yapıldı. Deneyin sanal ortamda gerçekleştirileceği kontrol odası, kontrol masası ve iç mekân tasarımından oluşan ana sahne 3DS Max ve Autodesk Maya programlarında düşük poli (low poly) olarak modellendi. Adli olaylarda sıklıkla karşımıza çıkan, 7.65x17 mm Browning, 9x19 mm Parabellum, .357x40 Magnum, .44 Magnum 33 mm, 5.56x45 mm M-16 Nato, 7.62x51 mm G3 Nato, 7.62x39 mm Kalashnikov mühimmat seçenekleri ve namluları

modellenecek deney ortamına dahil edildi (Şekil 3).

Mermi çekirdeğini tutucu olarak modellenen balistik sarkaç bloğu, sarkaç kolu, açı ölçer objeleri değiştirilebilir ve ölçülebilir özelliklere uygun dinamik yapıda 3D olarak modellenerek (Şekil 4), modeller için kullanılacak dokular Adobe Substance 3D Painter programıyla boyandı. 2D animasyonlar ise AdobeAfterEffects programında hazırlandı.



a. Ateşleme mekanizması

b. Balistik sarkaç bloğu, sarkaç kolu ve açı ölçer

Şekil 4. Balistik sarkaç düzeneği bölümleri

Tasarım aşaması bittikten sonra Unity 3D içerisinde üç boyutlu bir sahne oluşturuldu ve yazılımda kullanılacak 3D modeller, 2D görseller ve animasyonlar Unity ortamına aktarıldı (Şekil 5).



a. Sanal laboratuvar üstten görünümü



b. Kontrol paneli

Şekil 5. Kontrol odası, kontrol masası ve iç mekân tasarımı

### Yazılım Süreci

Proje Unity3D oyun motorunda C# tabanlı olarak yazılım haline getirilerek OOP (Object Oriented Programming) prensiplerine uygun olarak hazırlandı. Bilimsel hazırlık aşamasında hazırlanan formüller ve dosyalar analiz edilerek yazılım gereksinimleri belirlendi. Sistem mimarisi belirlenerek kullanılacak algoritmalar oluşturuldu. Sistem mimarisi oluşturulurken sahnede bulunan objelerin mekanikleri, kullanılacak efektler ve hesaplamalar göz önünde bulunduruldu. Hedeflenen sonuçlara ulaşmak amacıyla obje mekanikleri için Unity 3D fizik motoru ile birlikte bazı

özelleştirilmiş kodlar yazıldı. Hesaplamalar için matematiksel modeller oluşturuldu. Kullanılacak algoritmalar bu yöntemle belirlendikten sonra simülasyon yazılımının gerçekleştirilmesi adımıyla özelleştirilmiş mekanik kodları, efektler, hazırlanan kullanıcı arayüzleri için geliştirmeler yapıldı. Yazılım geliştirilirken “Singleton Tasarım Deseni” kullanıldı. Bu sayede bir yönetici sınıf üzerinden simülasyondaki adımlar kontrol edildi. Mekanik geliştirmeler tamamlandıktan sonra görsel kodlama için ışık, gölgelendirme ve partikül efektler (Unity3D içerisinde efekt hazırlama aracı) eklendi. Partikül efektler için özelleştirilmiş kodlar yazıldı. Mekanik geliştirmeler bittikten sonra uygulamanın performansını optimize etmek için çeşitli yöntemler izlendi. Bu yöntemlerle düşük gecikme süreleri ve akıcı bir deneyim sağlamak amaçlandı. Sistem ve Entegrasyon Testlerinin Gerçekleştirilmesi için Unity Profiller gibi performans izleme ve analiz araçlarını kullanarak performans testleri yapıldı. Mekanik testler için test modülleri oluşturuldu. Sorunların çözümü ve revizyonlar kısmında karşılaşılan mekanik sorunlar kod düzeltmeleri yapılarak, performansla ilgili sorunlar ise çeşitli tasarım optimizasyon yöntemleri izlenerek düzeltildi. Doku sıkıştırma (DXT, ETC, ASTC) yöntemleri kullanarak dokular sıkıştırıldı. Gerekli yerlerde Sprite Atlas kullanılarak sprite’ların tek bir atlada toplanması ve böylece aynı anda yüklenmesi gereken sprite sayısının azaltılması sağlandı. Uzaktaki nesnelere için düşük ayrıntı seviyeleri (LOD) sistemi kullanarak performansın artırılması sağlandı. Son olarak proje çıktısı alınmak suretiyle kullanılabilir duruma getirildi.

## BULGULAR

Balistik Sarkaç deneyinin sanal ortamda uygulaması “deney düzeneğinin hazırlanması”, “ateşlemeden önce ölçülen değerler”, “ateşlemeden sonra ölçülen değerler” ve “yaklaşık yöntemle göre yapılan hesaplamalar” olmak üzere dört aşamada gerçekleştirildi. Deney düzeneğinin hazırlanması, ateşleme öncesi ve sonrası aşamalarında başlangıç koşulları belirlendi. Sabit değerler girildi. Ölçümler yapılarak tablolar dolduruldu. Ateşleme sonrası hesaplamalar kısmında ise; analitik formüller üzerinden hesaplamalar yapılarak deneyin sayısal çıktıları elde edildi. Deney ortamı farklı kalibrelerden oluşan yedi çeşit mühimmat kullanarak yapılabilecek şekilde düzenlendi. Yaygın olarak kullanılan farklı kalibrelerde yedi çeşit mühimmatın teknik özellikleri Tablo 1’de gösterildiği gibidir.

Sanal deney uygulaması 9x19 mm Parabellum mühimmat seçilip, ateşlenerek deneyin bütün yapılaş aşamaları sırasıyla tatbik edilmek üzere bir kez çalıştırıldı.

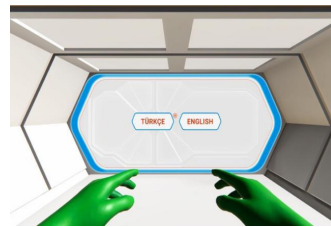
**Tablo 1. Farklı kalibrelerdeki mühimmatların teknik özellikleri (13)**

Kalibre	Mühimmat	Çekirdek Kütlesi /m/g	Çekirdek Çapı /r/mm	Hız /v/m/s
7.65x17 mm Browning		4.6	7.65	275
9x19 mm Parabellum*		5.7	9.00	597
.357x40 mm Magnum		10.2	9.10	557
.44 Magnum 33 mm		13.6	10.97	455
7.62x39 mm		7.8	7.90	715
5.56x45 mm Nato		5.2	5.70	874
7.62x51 mm Nato		10.9	7.82	816

\*Bu çalışmadaki veriler 9x19 mm Parabellum kullanılarak elde edildi.

## Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Sanal laboratuvar balistik sarkaç deney sahnesine dil seçimi yapılarak giriş sağlandı (Şekil 6). Sanal laboratuvar balistik sarkaç deney sahnesine dil seçimi yapılarak giriş sağlandı. Ateşleme öncesi aşamada 9x19 Parabellum silah deneyi yapmak için seçildi. Silah çeşidi seçimiyle birlikte bu ateşleme mekanizmasına yerleştirilmek üzere uygun namlu ve mühimmat seçimleri de yapıldı. Gerçek hayatın akışına uygun olarak sanal ortamda da güvenlik gerekçelerinin sağlanması amacıyla ateşlemenin yapıldığı laboratuvar alanından çıkılarak kontrol odasına geçiş sağlandı.



a. Dil seçimi



b. Ateşleme odası

**Şekil 6.** Balistik sarkaç deneyine giriş

## Ateşlemeden Önce Ölçülen Değerler

Kontrol odasında ateşleme yapılmadan önce mermi çekirdeğinin saplanacağı takozun kütlesi ve sarkacın boyu belirlendi. Mermi çekirdeğinin takoz ile merkezi çarpışma yapabilmesi için ateşleme mekanizmasının yükseklik ayarları

yapıldı. Yapılan bu hazırlık aşamasından sonra takozun kütlesi ve yüksekliği, sarkaç çubuğunun uzunluğu ve kütlesi, mermi çekirdeğinin kütlesi değerlerine bağlı çalışan deney düzeneğinde yapılan ölçümler sonucunda aşağıdaki formüller kullanılarak Lk (kütle merkezi), Ls (sarkaç sisteminin boyu) ve Lm (mermi çekirdeğinin saplandığı yerin uzaklığı) uzunlukları hesaplandı. Bu ölçüm değerleri Tablo 2'de gösterildi.

**Tablo 2. Deney düzeneğiyle ilgili ateşlemeden önce ölçülen veriler ve cevap anahtarı**

	Ölçülen Değerler	Kişiselleştirilmiş Cevap Anahtarı
<b>Amaç</b>	<b>Merminin ilk hızını hesaplayabilmek</b>	<b>Mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızını hesaplayabilmek</b>
Takoz Kütlesi / Mt / Kg	4.00	4.00
Takozun Yüksekliği /Lt/m	0.250	0.250
Çubuk Uzunluğu /Lç/m	1.198	1.190
Çubuğun Kütlesi /Mç/kg	1.19	1.20
Mermi Çekirdeği Kütlesi /m/g	5.70	5.70
Sarkacın Kütle Merkezinin Dönme Noktasına Uzaklığı / Lk /m	1.150	1.156
Sarkacın Tam Boyu / Ls/m	1.450	1.448
Mermi Çekirdeğinin Saplandığı Noktanın Dönme Noktasına Uzaklığı / Lm/m	1.300	1.322

Çubuk ve takoz sisteminde kütle merkezinin (Lk) hesaplanması:

$$Lk = \frac{Lç}{2} + \frac{(Mt + m)}{(Mt + Mç + m)} \frac{Lt + Lç}{2}$$

Mt: takoz kütlesi, Mç: çubuk kütlesi, m: mermi çekirdeği kütlesi

Çubuk ve takoz sisteminin toplam uzunluğunun (Ls) hesaplanması

$$Ls = Lç + Lt$$

Mermi çekirdeğinin saplanma uzaklığının (Lm) hesaplanması

$$Lm = Lç + \frac{Lt}{2}$$

Kullanıcının ölçülediği ve elde ettiği metriklere göre hesapladığı veriler ile tabloyu doldurmasının ardından,

kaydet butonuna basılarak tablonun artık müdahale edilemez bir özelliğe sahip olması sağlandı. Eş zamanlı olarak sistem tarafından kişiselleştirilmiş cevap anahtarı özelliği sayesinde tablonun ilgili bölümü otomatik olarak dolduruldu. Kişiselleştirilmiş cevap anahtarı, kullanıcının kendi tercih ettiği verileri kullanarak yaptığı deneyin yazılım yani sistem tarafından doğru cevabının otomatik olarak hesaplanması sonucu elde edildi. Bu sayede sonuçların karşılaştırılabilmesi imkânı oluşturuldu.

### Ateşlemeden Sonra Ölçülen Değerler

Ateşleme aşamasında ateşleme mekanizmasının kurma kolu kumandayla kuruldu. Tetik mekanizması kullanılarak ateşleme yapıldı. Ateşleme akabinde mermi çekirdeği ve sarkaç takozunun beraber hareketi izlenerek salınım sayısı sayıldı. Toplam geçen süre tutuldu. Aşağıdaki formül kullanılarak bu ölçülen değerler ile sarkaç periyodu hesaplandı. Bu ölçüm değerleri Tablo 3'te gösterildi.

**Tablo 3. Deney düzeneğiyle ilgili ateşlemeden sonra ölçülen veriler ve cevap anahtarı**

Mermi çekirdeği türü: 9x19 mm Parabellum	Kabul Edilen Salınım Sayısı /N	Sarkacın maksimum sapma açısı /Ø/Derece	Sarkacın toplam salınım süresi /t/s	Sarkacın periyodu /T/s
<b>Ölçülen Değerler</b>	7	12.50	16.64	2.37
<b>Kişiselleştirilmiş Cevap Anahtarı</b>	7	12.18	16.37	2.26

N: Toplam salınım sayısı, t: Toplam salınım için geçen süre

### 2. Aşama: Deneyin Yapılışı

Mermi çekirdeği takozu saplandıktan sonra beraber salınımları sırasında; sarkacın kütle merkezinin yükseklik değişimi, potansiyel enerji değişimi, kinetik enerji değişimi ve sistemin ortak hızı ile çekirdeğin namludan çıkış hızları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplandı. Bu hesaplama verileri Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4. Balistik sarkaçta hesaplanan veriler ve cevap anahtarı**

Mermi çekirdeği türü: 9x19 mm Parabellum	Sarkaç kütle merkezinin yükseklik değişimi /Δh/m	Sarkaç kütle merkezinin potansiyel enerji değişimi /ΔEp/J	Sarkaç kütle merkezinin kinetik enerji değişimi /ΔEk/J	Takoz ile çekirdeğin ortak harekete başlama hızı /V <sub>ortak</sub> /ms <sup>-1</sup>	Mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızı /V <sub>o</sub> /ms <sup>-1</sup>
<b>Ölçülen Değerler</b>	0.025	1.320	-1.320	0.720	652
<b>Kişiselleştirilmiş Cevap Anahtarı</b>	0.026	1.329	-1.329	0.715	597

Takoz kütle merkezinin yükselme miktarı

$$\Delta h = L_k(1 - \cos\theta)$$

Takoz ile çekirdek kütle merkezinin potansiyel enerji değişimi

$$\Delta E_p = (Mt + M\zeta + m) \cdot g \cdot L_k(1 - \cos\theta)$$

*Mt: takoz kütlesi, M $\zeta$ : çubuk kütlesi, m: mermi çekirdeği kütlesi*

Takoz ile çekirdek kütle merkezinin kinetik enerji değişimi

$$\Delta E_k = -\Delta E_p$$

Çekirdek saplandıktan sonra sistemin ortak harekete başladığı hız

$$V_{ort} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Mermi çekirdeğinin takozla sapanma hızı

$$V_{yaklaşık} = \frac{m + Mt + M\zeta}{m} \sqrt{2gL_k(1 - \cos\theta)}$$

*Mt: takoz kütlesi, M $\zeta$ : çubuk kütlesi, m: mermi çekirdeği kütlesi*

Seçilen mühimmeta göre ölçülebilen ve çıkarılan formüllerle göre hesaplanan veriler ilgili tablolara yazıldı. Kullanıcının yazdığı değerlerin tamamlanmasının ardından veriler sisteme kaydet butonu kullanılarak kaydedildi. Eş zamanlı olarak sistem tarafından oluşturulan kişiselleştirilmiş cevap anahtarı özelliği sayesinde sonuçların karşılaştırılmasına imkânı verildi.

## SONUÇ

Bu çalışmada, VR teknolojisi kullanılarak üniversite öğrencileri ve akademisyenlere yönelik uygulama imkânı sağlamak için tamamen bilimsel yasalara ve fiziksel gerçekliğe uygun olarak tasarlanarak adli fizik alanının konusu olan balistik sarkaç deneyinin sanal laboratuvar ortamında geliştirilmesi amaçlandı. Deney adli olaylarda sıklıkla karşımıza çıkan, 7.65x17 mm Browning, 9x19 mm Parabellum, .357x40 Magnum, .44 Magnum 33 mm, 7.62x39 mm Kalashnikov, 5.56x45 mm M-16 Nato, 7.62x51 mm G3 Nato'dan oluşan 7 farklı mühimmat seçeneği ile yapılabilecek şekilde geliştirildi. Test amaçlı deney düzeneği 9x19 mm Parabellum mühimmat için bir kere ateşlenerek çalıştırıldı. Deney sonunda yaklaşık yöntemle göre (ihmallerin önemsenmediği) mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızı değeri 652 m/s olarak hesaplandı. Cevap anahtarında kullanıcıların hassas ölçüm ve doğru hesaplamalar sonucu ulaşması beklenen referans değerden (597 m/s) 55 m/s yani %9,2'lik fark olduğu görüldü. Bu fark, beklenen doğrultuda açılma momentumun hesaba dahil edilmemesi, kullanıcının

yaptığı küçük ölçme hataları ve hesaplamalar sırasında yapılan ihmallerden kaynaklanmıştır.

Deney düzeneği hayatın olağan akışına uygun sahne ve bilimsel alt yapıya sahip şekilde dizayn edildiği için deneyde kullanıcılara hata yapabilme imkânı da sağlandı. Deney düzeneği ile dikey yaklaşımda, sanal ortamda 3 boyutlu ve bilimsel algoritmalara dayalı her öğrencinin kendi parametre değişikliği ile farklı sonuçlar ve kazanımlar elde edebileceği dinamik bir deney ortamı oluşturuldu. Yatay yaklaşımda ise, sanal laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar ile fiziki ortamda ulaşılmış değerlerin karşılaştırılabilme imkânı yaratıldı. Adli fiziğin bir alt dalı olan balistik bilimi eğitimi için özel donanımlı, resmi izine tabi, yüksek maliyetlerle kurulan laboratuvar gereksinime karşılık alternatif bir çözüm üretildi. VR deney kullanımı sayesinde zaman ve mekândan bağımsız, hibrit eğitime uygun, eğitmen ihtiyacı olmadan da deney yapabileme avantajı kazandırıldı. Eğitim amaçlı geliştirilen sanal laboratuvar deney uygulamasının, Adli Bilimler Enstitüleri, Milli Savunma Üniversiteleri, Polis Meslek Yüksek Okulları, Kriminal Laboratuvarlarda hibrit eğitim yapısına uygun olarak zaman ve mekândan bağımsız kullanılabilmesi imkânı oluşturuldu. Eğitime kolay erişim, fırsat eşitliği, çoklu deneme imkânı, sarf malzeme ihtiyacı ve maliyeti, çevreye verilen zarar, güvenlik riskleri gibi olumsuzlukları ortadan kaldırma adına sanal deney uygulaması çözüm olarak önerilmektedir.

## BİLDİRİMLER

### Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

### Finansal Destek

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir malî destek kullanımı bildirmemişlerdir.

### Etik Beyan

Bu çalışma etik kurul onayına ihtiyaç bulunmamakta olup Helsinki Bildirgesi kriterleri göz önünde bulundurulmuştur.

### Yazarlık Katkısı

Fikir: OE, AYS, Tasarım: OE, AYS, Gözetim: OE, AYS, Finansman: OE, AYS, Araç gereç: OE, AYS, Veri toplama ve işleme: OE, AYS, Analiz ve yorumlama: OE, AYS, Literatür tarama: OE, AYS, Yazma: OE, AYS, Eleştirel inceleme: OE, AYS,

## KAYNAKLAR

1. Çeker D. Olay yeri inceleme ve çalışmalarında adli arkeolog ve adli antropologların rolü: Kuzey Kıbrıs ve Türkiye'deki güncel durum. Antropoloji. 2016;32:13-21. [https://doi.org/10.1501/antro\\_0000000335](https://doi.org/10.1501/antro_0000000335)
2. Netzel LR, Kiely TF, Bell S. Evidence: Origins, types, and admissibility. In James SH, Nordly JJ, Bell, S, editors. Forensic Science. 4th ed. CRC Press; 2014. p. 37-50. <https://doi.org/10.1201/b16445-7>

3. Nilendu D. Enhancing forensic education: exploring the importance and implementation of evidence-based education system. *Egypt J Forensic Sci.* 2024;14(6):1-11. <https://doi.org/10.1186/s41935-023-00375-w>
4. Mayne R, Green H. Virtual reality for teaching and learning in crime scene investigation. *Sci Justice.* 2020;60(5):466-472. <https://doi.org/10.20944/preprints202004.0434.v1>
5. Cardwell A., Murray J, Croxton R., Nurse B. The use of virtual reality in education and learning: A case study for teaching crime scene investigation. In *EDULEARN17 Proceedings. IATED;* 2017. p. 3005-3015. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2017.1630>
6. Sieberth T, Seckiner D, Dobay A, Dobler E, Golomingi R, Ebert L. The forensic holodeck—Recommendations after 8 years of experience for additional equipment to document VR applications. *Forensic Sci Int.* 2021;329,1-7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111092>
7. Sieberth T, Dobay A, Affolter R, Ebert LC. Applying virtual reality in forensics—a virtual scene walkthrough. *Forensic Sci Med Pathol.* 2019;15:41-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110006>
8. Thibeault M. Forensic science professor brings her innovative vr tech to RWU [Internet]. Roger Willams University; 2022 [cited 2023 Feb 27]. Available from <https://www.rwu.edu/news/news-archive/forensic-science-professor-brings-her-innovative-vr-tech-rwu>
9. Guarnera L, Giudic, O, Livatino S, Paratore AB, Salici A, Battiato S. Assessing forensic ballistics three-dimensionally through graphical reconstruction and immersive VR observation. *Multimed Tools Appl.* 2023;82(13):20655-20681. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14037-x>
10. Rathod VR. Role of Forensic Science Laboratory in the Investigation of Crime. *JCrimForensicstudies.* 2018;1(1):180003.
11. Heard BJ. *Handbook of firearms and ballistics: examining and interpreting forensic evidence.* John Wiley & Sons; 2011.
12. Khalilia WM, Gombár M, Palková Z, Palko M, Valiček J, Harničárová M (2022). Using virtual reality as support to the learning process of forensic scenarios. *IEEE Access.* 2022;10:83297-83310. . <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3196471>
13. Fortified Estate. Fortified Estate Fiberglass Ballistic Panels [Internet]. [cited 2023 Feb 27]. Available from <https://fortifiedestate.com/product/bullet-resistant-fiberglass-panels/>