



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

## Tungsten Uzun Çubuk Tipi Penetratörlerin Zırh Çelikleri Üzerindeki Delme Etkinliğinin Penetrasyon Modeller ile İncelenmesi

### Depth of Penetration Behaviour Analysis of Tungsten Long-Rod Penetrator Impacting on Armour Steel by Penetration Models

Ahmet Kaan Toksoy 

Balistik Koruma Sistemleri Direktörlüğü, Roketsan A. Ş., Ankara, TÜRKİYE  
 Sorumlu Yazar / Corresponding Author: ktoksoy@roketan.com.tr

#### Öz

Uzun çubuk tipi Tungsten penetratörlerin RHA (haddelenmiş homojen) zırh çelikleri üzerine yüksek hız ile çarpması esnasında oluşturduğu penetrasyon zırh sistemlerinin zafiyet analizleri ve balistik verimlerinin belirlenmesi için çok önemlidir. Çalışma kapsamında farklı boy/çap oranlarına (L/D) sahip Tungsten uzun çubuk penetratörlerin yarı sonlu RHA zırh çelikleri üzerinde 665-3500m/s çarpma hızı aralığındaki penetrasyonunu ampirik ve analitik modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için Python kodlama dilinde program yazılarak malzeme bilgileri, çarpma hızı ve geometrik özellikleri girdi olarak kullanılmış delme derinliği çıktı olarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen hesaplama sonuçları 150 adet farklı veri noktasını içeren test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma çalışmaları kapsamında ampirik ve analitik modellerin hesaplama hataları belirlenmiştir. Özellikle ampirik denklemlerin geçerli olduğu L/D değeri için hata oranının düşük olduğu fakat geniş L/D aralığı (10-30) için %9 hata değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında Aleksiveeski-Tate modelinin L/D oranı arttıkça hata oranının arttığı, Walker-Anderson penetrasyon modelinin ise hem tüm L/D değerleri için deney sonuçlarına en yakın değerlerini verdiği hem de L/D değerleri artmasına rağmen hata oranını artırmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uzun çubuk tipi tungsten penetratör, Yüksek hız penetrasyonu, RHA Zırh Çeliği, Penetrasyon mekaniği

#### Abstract

The penetration behavior of Tungsten long rod penetrators on RHA (Rolled-homogenous Armor) steels is very important for vulnerability analysis and ballistic efficiency determination of armor systems. Within the scope of the study, the penetration of Tungsten long rod penetrators with different length to diameter ratios (L/D) on semi-infinite RHA armor steels with various impact velocities between 665-3500 m/s was calculated by using empirical and analytical models. In order to make these calculations, a program was written in Python coding language. Material properties, impact velocity and geometric properties were used as inputs while the penetration depth was obtained as an output. Calculated penetration values were compared with test results for 150 different data points. Also, calculation errors between experimental and empirical/analytical models were determined. It has been found that the error rate was low, especially for the lower L/D values where empirical equations are valid, but for empirical equation which is valid for greater L/D range (10-30) only 9% error rate was achieved. In addition, it was determined that the error rate of the Aleksiveeskii-Tate penetration model increased as the L/D ratio increased, while the Walker-Anderson penetration model gave the closest values to the experimental results for each L/D value and the error rate did not increase even though the L/D values increased.

**Keywords:** Tungsten long-rod penetration, High Velocity Impact, RHA Steel, Penetration Mechanics

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Vulnerability analysis of armored vehicle plays a vital role for modern days land platforms. One of the effective threats on the armored vehicles is long rod penetrators made from heavy metal alloys such as Tungsten or Depleted Uranium. Target effects of these type of threats are widely studied. Studied targets are in wide spectrum from mono-structures such as finite or semi-infinite armour steels, ceramics or multi-layered armour structures to optimize for protection or handling V50 ballistic velocity. Depth of penetration on semi-infinite target, especially on RHA steel, values are required for both ballistic efficiency determination and armor structures vulnerability decisions.

Characterization of penetration capability of Long-rod penetrators has been studied based on its geometrical properties such as length to diameter ratio, tip structures. Also, different materials used for DOP characterization of long-rod penetrators on RHA steels. Several empirical equations developed for penetration estimation of penetrators with different L/D ratios. However, each empirical equation is limited with defined velocity range, specific L/D and needs extended data points for constructing them. Analytical penetration models were employed for calculation of penetration behavior of long rod penetrators on both semi-infinite and multi-layered targets.

Penetration models require material properties such as dynamic yield strength, target resistance stress etc.

Within the scope of the study, the penetration of Tungsten long rod penetrators with different diameter-to-length ratios (L/D) on semi-infinite RHA armor steels with various impact velocities between 665-3500 m/s was calculated using empirical and analytical models. In order to make these calculations, a program was written in Python coding language. Material properties, impact velocity and geometric properties were used as inputs, and penetration depth was obtained as an output. Calculated penetration values were compared with test results for 150 different data points. Also, calculation errors between experimental and empirical/analytical models were determined.

### Materials and Methods

Depth of penetration results of Tungsten long-rod impact on semi-infinite RHA steel has been found on literature survey. Related L/D ratios and impact velocity range is summarized in Table 1. Experimental results are collected for long rod penetrators with calibers in between 25mm and 140mm and also specially designed penetrators and sabot package for gas gun launched Figure 1. Totally 150 depth of penetration values for six different L/D has been found and used for this study.

Moreover, empiric equation in literature and newly defined in this study for different L/D ratios of the long rod penetrator was used to calculate of depth of penetration values of Tungsten penetrators impacting RHA steel targets, Equations 1-7 and 12-13. Analytical penetration models Aleksiveeskii-Tate and Walker-Anderson has been explained with details of assumption and material properties of Tungsten and RHA steels in Table 2. Models were also used to estimate the depth of penetration for the comparison with experimental results.

### Results and Discussion

Proposed equation by Silsby et al. [37], Eqn 4, predicts DOP values lower than the experimental results of L/D=10 tungsten long-rod penetrators, Figure 2 (a). On the other hand, Eqn 1 defined by Anderson et al. estimated better DOP values for L/D=10 penetrators. It was observed that both empiric equations, Eqn. 2 and 4, overestimated test results of L/D=15 long rod Tungsten penetrator impact on RHA steel target. Prediction of Eqn. 12 was well aligned with experimental results, Figure 2 (b). It is obvious that there is no DOP data between 1900-2800 m/s impacting velocity for L/D=15 penetrators which decreases estimation capability of empiric equations. Similar results were found for L/D=20 projectile penetration behavior, Figure 2(c). Generally, Eqn. 4 has averagely good estimation tool for penetrator that have L/D ratio over 20, Figure 2(d).

Lanz-Odermatt also proposed an empiric approach for tungsten long rod penetration on RHA steel targets, Eqn 4. Original study only includes calibers between 25 and 140mm of long rod projectiles. In this study, new data points were added to original data set and capability of DOP prediction was checked, Figure 3. Former prediction capability of Lanz-Odermatt equations was calculated as %5 error rate [17]. However, percentage between predicted DOP values over experimental results exceeded 14%

especially for L/D=10 projectile penetrator. It is concluded Lanz-Odermatt equation cannot satisfy on estimation of DOP values of L/D values of this study.

Codes created by using Python programming language was used for DOP calculation of both Aleksiveeskii-Tate and Walker-Anderson penetration model for long-rod projectile. Experimental results and calculations were compared, Figure 4. Aleksiveeskii-Tate penetration model predicts L/D=10 tungsten long-rod DOP values higher than experimental results up to 1000m/s impact velocity. A-T model showed good correlation with experimental results when the impact velocities in between 1000 and 2000m/s. However, above the 2000m/s A-T model predicts DOP values lower than experimental results for all L/D range, Figure 4. Unlike Anderson-Tate penetration model, Walker-Anderson penetration model predicts DOP results of tungsten long rod projectile impacting on RHA steel targets for all L/D ratios.

DOP Prediction error analysis was made for both empiric and analytic penetration models suggested for prediction of depth of penetration, Table 3. Except for Lanz-Odermatt equation, empiric equations proposed at previous studies for L/D=10 and 20 gave acceptable level of prediction error as 5%. However, this situation found different for proposed equation for L/D=15 long rod penetrator, Eqn 2, which resulted with 14% prediction error. New empiric equations, Eqn 12 and 13, for L/D=15 and L/D=20 values was resulted with less error than previous prediction models. Eqn 4 defined by Silsby et al [37] has been estimated prediction DOP value with 8% error ratio in their study. But adding a new data set for DOP values resulted with slight increasing of error rate as %9. Aleksiveeskii-Tate model generally resulted with higher error rate between 5% and 13.7% which were higher than empiric equations results. However, Walker-Anderson model prediction resulted with maximum 3.3%.

### Conclusion

150 different DOP results of Tungsten long rod penetrators impacting on RHA steel targets from various impact conditions such as L/D, impact velocities collected and used for comparison purposes. Empiric and analytic penetration models were also used for calculation DOP values of experimental data points. Especially, time iterative computer codes have been established for analytical penetration models. Lanz-Odermatt empiric equations have good estimation capacity only for the long-rod penetrators defined at their study, which are in between 25-140mm calibers. However, new data DOP results could not be estimated with good approximation. It was found that empirical equations defined for specified L/D ratios of long-rod penetrators resulted with acceptable estimation of DOP values in their boundaries. In this limitation, calculated DOP results gave good approximation when results compared to Aleksiveeskii-Tate analytical penetration model. Error ratio increased with higher L/D ratio in Aleksiveeskii-Tate model. On the contrary, Walker-Anderson penetration model gave the best estimation of DOP value at RHA steels in terms of error between experimental and calculation results.

## 1. Giriş

Günümüzün muharebe araçları gerek mürettebatını gerek üzerinde taşıdıkları geniş spektrumdaki sensör ve silah sistemleri gibi kritik alt sistemlerinin düşman ateşinden korunması amacı ile özel olarak tasarlanmaktadır. Bu amaçla

zırh sistemlerinde kullanılan çok farklı malzemelerinin ilgili tehditlere karşı delme analizleri araçların zayıf bölgelerinin ortadan kaldırılması ve zafiyet analizlerinin yapılabilmesi için yaygın olarak yapılmaktadır.

Zafiyet analizlerinin hızlı bir şekilde yapılabilmesi için tehditlerin hedefler üzerinde delme derinliklerinin belirlenmesi büyük

öneme sahiptir. Penetrasyon davranışının belirlenmesi amacı ile gerek tehditlerin gerekse hedeflerin geometrik ve malzeme özellikleri araştırılmaktadır [1-2]. Çalışmalar teknolojinin gelişmesi ile beraber monolitik yapılardan çok katmanlı zırh yapılarına doğru gelişmiştir [3]. Bunun yanında penetratör teknolojinde ciddi değişiklikler meydana gelmiştir. Zırh delici sabotlu tehditler (APDS) yerine uzun çubuk tipi sabotlu kanat stabilizeli (APDSFS) tehditler yaygın şekilde zırh sistemlerine karşı kullanılır hale gelmişlerdir. Bu tehditler 25mm kalibreden başlayarak 140 mm kalibreye kadar değişiklik göstermektedirler, [4-6].

Zırh delici uzun çubuk tipi penetratörlerde başlangıçta çelik alaşımları kinetik enerjili delicilerin ana malzemesi olarak kullanılırken, toz metalürjisi tekniklerinin gelişmesi ile birlikte yüksek yoğunluğa sahip Tungsten alaşımları veya seyreltilmiş Uranyum gibi malzemeler penetrasyon derinliğinin artırılması amacıyla tercih edilmişlerdir. Özellikle yüksek yoğunluğa sahip Tungsten vb. alaşımlar 1960 yılından günümüze kadar uzun çubuk tipi penetratörler için yaygın olarak kullanılmaktadır [4,7].

Uzun çubuk tipi penetratörlerin kalibrelerine bağlı olarak boy/çap (L/D) oranları 10-30 değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Benzer şekilde hedef vuruş açısının (Obliquity) veya penetratörün atış hattı ile yaptığı açısının (Yaw) değişimi ile yarı sonlu hedeflerin üzerindeki delme derinliklerinin değişimi incelenmiştir [8, 9]. Bu incelemeler ile penetratörlerin malzeme özellikleri kadar geometrik özelliklerinin veya tehdit hedef ilişkisinin penetrasyon üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Bunun yanında uzun çubuk tipi penetratörlerin uç kısımlarının geometrik özelliklerinin delme üzerindeki etkileri de araştırılmıştır [10, 11]. Farklı uç geometrik tasarımlarının özellikle açılı vuruşlarda delme davranışına olan etkileri çalışılmıştır.

Uzun çubuk tipi penetratörlerin yarı sonlu hedefler üzerinde ki delme derinliklerinin sayısal olarak tahmin edilmesi için birçok araştırmacı tarafından ampirik denklemler geliştirilmiştir. Bu ampirik denklemler hesaplama süresi açısından çok hızlı olmak ile beraber elde edilen sonuçların doğruluğu deneysel veri grubunda tanımlanan çarpma hızı, L/D oranı ve hedef malzemesine bağlı kaldığı gözlemlenmiştir [12-14].

Bunlara paralel olarak zamana bağlı analitik çözümleme modelleri ise yarı sonlu hedefler üzerinde uzun çubuk tipi penetratörlerin delme derinliklerinin belirlenmesi için oluşturulmuşlardır [15-17]. Analitik penetrasyon modelleri ampirik tahminleme yöntemlerine göre kompleks matematiksel

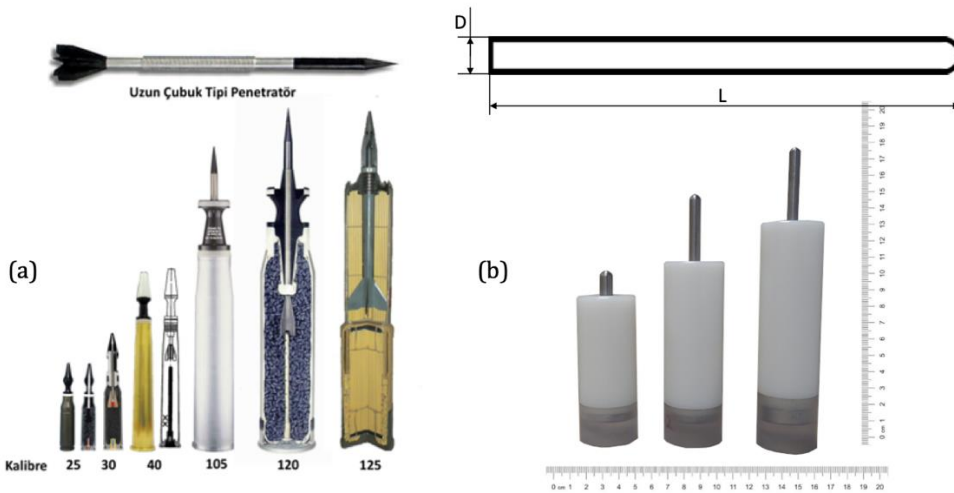
yöntemleri kullanmalarına rağmen farklı tip penetratörler ve hedef malzemeleri üzerinde elde edilen delme derinliklerinin tahminlenmesinde de kullanılabilirlerdir. Yarı sonlu üzerindeki delme derinliklerinin belirlenmesi zırh sistemlerinin geliştirilmesi açısından çok önemlidir. Bu değerler katmanlı zırh sistemlerinin balistik verimlerinin hesaplanmasında ve zafiyet analizlerine girdi olarak kullanılmaktadır [18-21]. Zafiyet analizlerinde katmanlı zırhın geometrik pozisyonuna bağlı olarak uzun çubuk tipi penetratöre karşı zırhın balistik verimi belirlenerek, zırhın ilgili pozisyonunda delinmenin gerçekleştiğine ya da gerçekleşmediğine sayısal olarak karar verilmesini sağlanmaktadır [3, 22].

Bu çalışma kapsamında farklı çalışmalardan elde edilen uzun çubuk tipi penetratörlerin yarı sonlu hedefler üzerindeki deneysel delme derinlikleri toplanarak karşılaştırma çalışmaları için veri grubu oluşturulmuştur. Çalışmada uzun çubuk tipi penetratörün, boy ve çap oranı bilgisi, yarı sonlu hedefe çarpma hızı ve geometrisi analiz kapsamında hesaplamalar için girdi olarak kullanılmıştır. Uzun çubuk tipi penetratörün malzemesi Tungsten, yarı sonlu hedef malzemenin ise haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA, Rolled Homogeneous Armor Steel) olarak alınmıştır. Veri grubu içerisindeki farklı boy ve çap oranlarına sahip penetratörlerin yarı sonlu hedeflerdeki delme derinlikleri etkinlikleri ampirik ve analitik penetrasyon modelleri ile hesaplanmıştır. Analitik modeller için gerekli hesaplamaların yapılması için zamana bağlı hesaplama yapabilen kod yazılıp her bir veri noktası için çalıştırılarak delme derinlikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar sonunda ampirik ve analitik penetrasyon modelleri ile elde edilen delme derinliği sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel Veriler

Analizlerin yapılması amacı ile farklı çap ve boylardaki Tungsten malzemenin üretilmiş uzun çubuk tipi penetratörlerin yarı sonlu RHA hedefler üzerinde gerçekleştirilen çarpışma testleri sonrası elde edilen delme derinlikleri farklı çalışmalardan toplanmıştır. Bu penetratörler konvansiyonel silah sistemlerinden atılabilen farklı kalibrede üretilen tehditler olduğu gibi gazlı fırlatma sistemlerinden fırlatılmak üzere geliştirilmiş sabotlarla fırlatılan Tungsten malzemelerden üretilmiş penetratörlerdir, Şekil 1. Tehdit L/D oranları, çarpma hızları ve alındıkları kaynak bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında toplamda 150 farklı deney sonucu kullanılmıştır.



**Şekil 1.** a) Farklı kalibredeki uzun çubuk tipi penetratörler b) gazlı fırlatma sistemlerinden hedef üzerine atılan uzun çubuk tipi penetratörler.

**Figure 1.** a) Long rod penetrators with different caliber, b) long rod penetrator and its sabot for gas launching system against target.

**Tablo 1.** Uzun çubuk tipi penetratörlerin L/D ratio, Çarpma hızı ve veri kaynakları.**Table 1.** Information about long rod penetrator L/D ratio, Impact Velocity and data source.

L/D	Çarpma Hız Aralığı (m/s)	Veri Kaynağı	Test Adeti
10	863-1756	[23-28]	54
12	665-1535	[23]	18
14	984-1358	[18], [29]	11
15	1240-2990	[30-32]	21
20	1278-3020	[31,33-36]	34
30	1094-3500	[27,31, 37]	12

## 2.2. Ampirik Denklemler

Yarı sonlu RHA hedefler üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen veriler, penetratörün L/D oranına spesifik olarak hedef üzerindeki penetrasyon ve çarpma hızı arasındaki en uygun ampirik bağıntıyı kurmak üzere kullanılmıştır. Elde edilen ampirik denklemler lineer ilişki içerisinde olduğu gibi hiperbolik veya eksponansiyel olacak şekilde de ifade edilmiştir.

L/D=10 olan Tungsten uzun çubuk penetratörün yarı sonlu RHA çelik hedefler üzerindeki penetrasyon derinliği tahminlenmesi için Woosley ve arkadaşları tarafından oluşturulan ampirik denklem aşağıdaki şekilde verilmiştir [34-35];

$$\frac{P}{L} = 1.06V - 0.712 \quad (1)$$

L/D=15 olan Tungsten uzun çubuk penetratör için; Anderson ve arkadaşları tarafından oluşturulan ampirik denklem aşağıdaki şekilde verilmiştir [13];

$$\frac{P}{L} = 0.997V - 0.682 \quad (2)$$

Benzer şekilde L/D=20 olan Tungsten uzun çubuk penetratörlerin RHA üzerindeki penetrasyonu için oluşturulan ampirik denklem aşağıdaki denklem verilmiştir [14].

$$\frac{P}{L} = \frac{1.606 \times V^{4.273}}{1.542 \times V^{4.273} + V^{4.273}} \quad (3)$$

Silsby ve arkadaşları daha geniş L/D (10-30) aralığı için Tungsten uzun çubuk penetratörün RHA çelik üzerindeki penetrasyon derinliği ve delici boyu ilişkisi için toplamda 100 farklı veri noktası kullanarak aşağıdaki denklemi oluşturmuşlardır, [37].

$$\frac{P}{L} = (1,239 + 0,00875V) / (1 + 117e^{(-3,5V)}) \quad (4)$$

Denklem 1-3 için geçerli vuruş hız aralığı 800 ve 1750m/s olurken, Denklem 4 için geçerli hız aralığı ise 600 ile 4500m/s arasındadır.

### 2.2.1. Lanz-Odermatt Ampirik Denklemi

Lanz-Odermatt ampirik denklemi aşağıda verilmiştir [17];

$$\frac{d}{D} = a(L/D)(\cos\theta)^m \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}} e^{-\frac{cR_m}{\rho_p V_i^2}} \quad (5)$$

Bu denklemde L, penetratör uzunluğunu, D ise çapını ifade etmektedir.  $\theta$  penetratörün hedefe vuruş açısını,  $\rho_p$  ve  $\rho_t$  penetratör ve hedef malzeme yoğunluklarını,  $R_m$  hedef

malzemesi çekme mukavemetini,  $V_i$  ise penetratörün hedefe vuruş hızını ifade etmektedir. Başlangıçta 105-140mm kalibre APFSDS (Armor-Piercing Fin-Stabilized Discharging Sabot) tipi uzun çubuk tipi penetratörlerden elde edilen veriler kullanılırken, veri kütüphanesi 25-35mm kalibre uzun çubuk tipi penetratörleri de içerecek şekilde genişletilmiştir [45]. Denklem içinde yer alan a sabiti ise aşağıdaki denklem üzerinden hesaplanmaktadır.

$$a \frac{L}{D} = (L/D) + 3.94 \left(1 - \tanh \frac{L/D-10}{11.2}\right) \quad (6)$$

m ve c değerleri Lanz ve Odermatt'ın orijinal çalışmasında 0.745 ve 25.9 gibi sabit değerler iken daha sonra Jeanquartier ve Odermatt [45] tarafından yapılan çalışmada m sabitinin değeri 0.775 olarak belirlenmiş, c sabiti ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$c = 22.1 + 1.274e^{-8R_m} - 9.47e^{-18R_m^2} \quad (7)$$

Lanz-Odermatt ampirik denkleminde delici ve hedef malzemesi Tungsten ve RHA zırh çeliği olarak belirlenmiştir. Denklemde kullanılan deneysel veri için L/D aralığı 11-31 değerleri arasında vuruş hızı ise 1100-1900m/s arasında değişmektedir.

Lanz-Odermatt denklemi diğer ampirik denklemlerden hedef malzemenin çekme mukavemetinin ve vuruş açısının denklem içerisinde yer alması nedeni ile farklıdır. Denklem farklı L/D değerleri ve vuruş açıları üzerinde gerçekleştirilmiş yarı sonlu çelik malzemelerden elde edilmiş 41 farklı test sonucuna bağlı olarak çıkarılmıştır. Günümüzde yaygın olarak zafiyet analizlerinde kullanılmaktadır [46].

### 2.3. Aleksveeskii-Tate Penetrasyon Modeli

İki farklı araştırmacı, Aleksveeskii ve Tate birbirinden habersiz aynı konu üzerinde ve birbirlerine yakın zamanlarda çalışarak uzun çubuk tipi delicilerin yarı sonlu hedefler üzerindeki delme derinliklerini hesaplayan analitik yöntemi geliştirmişlerdir, [15, 16]. Her iki araştırmacı Bernoulli denklemini tek boyutlu penetrasyon davranışını çözmek amacı ile modifiye ederek aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$$\frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + R_t \quad (8)$$

Burada  $\theta$  delici arka kısmındaki hız,  $\theta$  hedef içerisindeki penetrasyon hızını,  $Y_p$  penetratör mukavemetini,  $R_t$  ise hedef direncini ifade etmektedir.  $Y_p$  ve  $R_t$  değerleri malzemeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir.  $Y_p$  değeri malzemenin Hugoniot Elastik Limit (HEL) ile aynı değerde olduğu belirtilmiştir [15, 47]. HEL değeri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [41].

$$HEL = Y(1 - \lambda) / (1 - 2\lambda) \quad (9)$$

Y malzemenin çekme mukavemeti,  $\lambda$  ise poisson oranıdır.  $R_t$  değeri ise malzemenin dinamik çekme mukavemetinin 4 ile 5 katı arasında değişiklik göstermektedir [16]. Penetratör ve hedef yapı malzemeleri olan Tungsten ve RHA için kullanılan  $Y_p$  ve  $R_t$  değerleri Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 2'den görüleceği üzere Tungsten ve RHA malzeme için farklı  $Y_p$  ve  $R_t$  değerleri belirli bir aralık içinde değişiklik göstermektedir. Bunun sebebi ise Tungsten ve RHA için kullanılan test numunelerinin üretildiği ana malzeme bloklarının farklı alaşımlardan elde edilmesidir. Örnek olarak penetratör malzemesinin ağırlıkça %91-%93 Tungsten'den veya hedef zırh çeliklerinin ilgili MIL-DTL-12560K [48] standartında belirtilen birçok farklı sınıflardan elde edilmesi olarak verilebilir.

**Tablo 2.** Tungsten ve RHA malzemeler için Yp ve Rt değerleri.**Table 2.** Yp and Rt values for Tungsten and RHA materials.

Penetratör / Hedef Malzeme	Yp (GPa)	Rt (GPa)	Veri Kaynağı
Tungsten	0.8		[38]
	1		[39]
	1,66		[40]
	2		[41]
	1.14		[42-43]
RHA		5,1-5.5	[39]
		4.94	[44]
		4,37	[42]

#### 2.4. Walker-Anderson Penetrasyon Modeli

Walker ve Anderson momentum denklemini belirli kabuller yaparak geliştirmişlerdir [49]. Öncelikle penetratör ve hedef aksel simetrik olarak tanımlanmıştır. Penetratör ile hedef ara yüzünün penetrasyon ile beraber değişimi zamana bağlı olarak,  $Z_i(t)$  şeklinde ifade edilmiştir. Penetratörün arka ucunun konumu ise  $Z_p(t)$  olarak tanımlanmıştır. Başlangıç zamanında  $Z_i(0)=0$  ve  $Z_p(0)=-L_0$  olarak kabul edilmiştir,  $L_0$  penetratörün başlangıç uzunluğudur. Araştırmacılar penetratör ve yarı sonlu hedefler üzerinde gerçekleştirdikleri analizleri inceleyerek penetrasyonun analitik olarak modellenmesine yönelik aşağıdaki kabulleri yapmışlardır.

1. Hız profili merkez çizgisi üzerinde hem penetratör hem de hedef için tanımlanmıştır.
2. Penetratörün arka ucu delici içerisinde hareket eden elastik dalga hareketi nedeni ile yavaşlamaktadır. Elastik dalgalar penetratörün arka ucundan geri dönmekte ve penetratör içerisinde oluşan elastik-plastik deformasyon ara kesitinden tekrar geri yansımaktadır.
3. Hedef malzemenin kayma mukavemeti davranışı delinme analizinin yapılabilmesi için tanımlanmıştır.

İlgili kabuller kullanılarak gerçekleştirilen bir seri matematiksel analiz sonrasında Bernoulli denklemi aşağıdaki şekilde oluşturulmaktadır.

$$\rho_p \dot{v}(L-s) + \dot{u} \left( \rho_p s + \rho_t R \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right) + \rho_p \left( \frac{v-u}{s} \right) \frac{s^2}{2} + \rho_t \dot{\alpha} \frac{2Ru}{(\alpha+1)^2} = \frac{1}{2} \rho_t (v-u)^2 - \left( \frac{1}{2} \rho_t u^2 + \frac{7}{3} \ln(\alpha) Y_t \right) \quad (10)$$

Denklemden ki  $s$  penetratör üzerindeki plastik deformasyon bölgesini,  $R$  hedef üzerindeki deformasyon kanalı yarıçapını,  $\alpha$  boyutsuz bir parametre olup hedef üzerindeki deformasyon bölge yarı çapını  $R$  ile çarpılarak ifade etmeye yarayan bir sabit,  $Y_t$  hedef mukavemetini ifade etmektedir.  $R$  değeri penetratör ve hedef malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Farklı çalışmalarda  $R$  değerinin Tungsten penetratörün RHA çelik hedefe çarpma hızına bağlı olarak değişimi ampirik olarak belirlenmiştir [8, 49-50]. Bu kapsamda gerek testlerde elde edilen delinme krater çapı veya sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar doğrulama amacı ile kullanılmıştır. Bu çalışmada

kullanılan  $R$  değerinin çarpma hızına olan değişimi Walker-Anderson tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir [49].

$$R = R_p (1 + 0.287v_0 + 0.148v_0^2) \quad (11)$$

Denklemden  $R_p$  penetratör yarı çapını,  $v_0$  ise penetratörün hedef üzerine çarpma hızını ifade etmektedir. Gerek Aleksivskii-Tate, gerek Walker-Anderson penetrasyon modeli için kodlar yazılarak Tablo 1'de özetlenen her bir deneye ait  $L/D$  oranı ve çarpma hızları için çalıştırılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

### 3. Ampirik ve Analitik Modeller ile Hesaplanan Delme Derinliklerinin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması

#### 3.1. Ampirik Denklemler

Bölüm 2'de verilen ampirik denklemler kullanılarak  $L/D=10-30$  değerleri için 665-3500 m/s çarpma hızı aralığında delme derinlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen delme derinlikleri (P), deneysel veriler ile karşılaştırılmak amacı ile penetratör boyuna oranlanarak ( $L$ ), çarpma hızına bağlı, karşılaştırılmalı olarak verilmiştir, Şekil 2. Ayrıca,  $L/D=15$  ve  $L/D=20$  olan uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA çelik hedef üzerindeki delme derinliğinin hesaplanması için üçüncü dereceden yeni ampirik denklemler oluşturulmuş ve test verileri ile karşılaştırılmıştır. İlgili denklemler aşağıdaki verilmiştir.

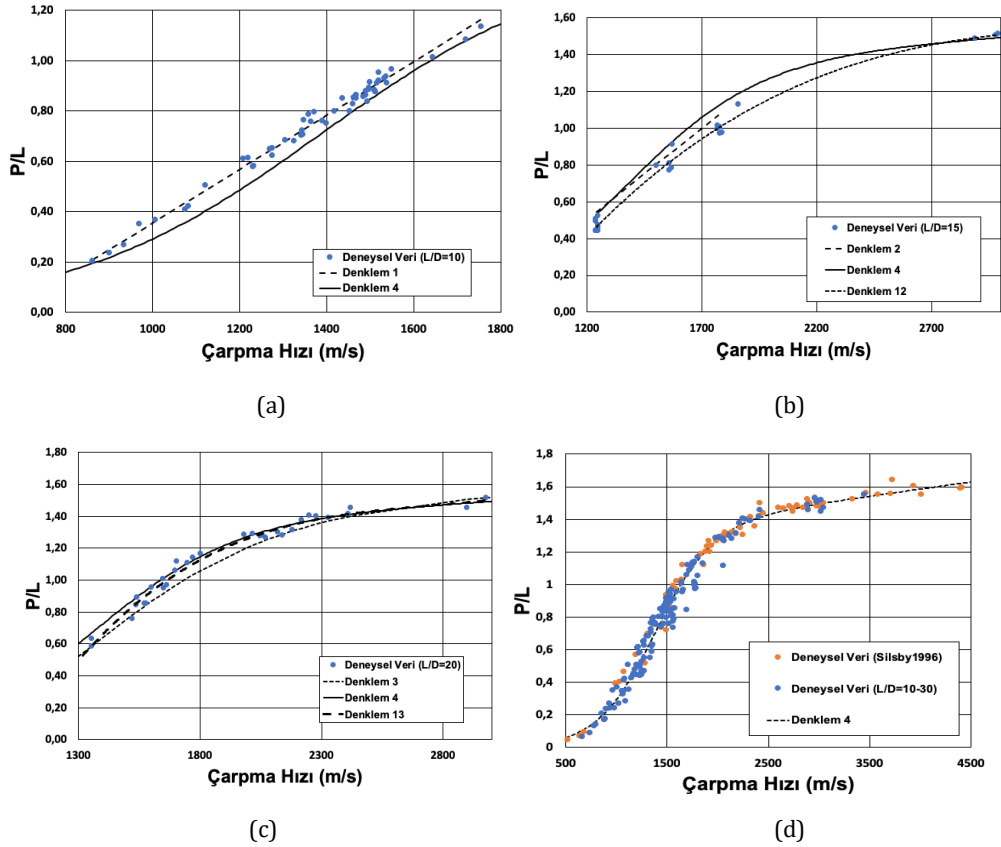
$L/D=15$  olan penetratörler için,

$$\frac{P}{L} = 6.332 \cdot 10^{-11} \times V^3 - 7.22 \cdot 10^{-6} \times V^2 + 0.00275 \times V - 1.96 \quad (12)$$

$L/D=20$  olan penetratörler için,

$$\frac{P}{L} = 2.6510^{-10} \times V^3 - 2.1710^{-6} \times V^2 + 0.006 \times V - 4.30 \quad (13)$$

Şekil 2 (a)'dan görüldüğü üzere  $L/D=10$  olan penetratörler için Silsby ve arkadaşları tarafından oluşturulan Denklem 4 ile hesaplanan değerler deneysel verilerin altında kalmaktadır [37]. Bunun yanında, sınırları daha kesin olarak belirlenen Denklem 1'in bu  $L/D$ 'ye sahip Tungsten penetratörlerin RHA hedefler üzerindeki penetrasyonunu deneysel verilere oldukça yakın tahmin edildiği görülmektedir.  $L/D=15$  için literatürde verilen ampirik denklemler deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında yüksek değerler vermektedir, Denklem 2 ve 4. Bu çalışmada verilen Denklem 12 sonuçları açısından  $L/D=15$  için delme derinliklerini daha iyi hesaplayabildiği görülmüştür. Fakat bu  $L/D$ 'ye sahip uzun çubuk tipi penetratörler için 1900-2800m/s hız aralığı için yeterli veri olmadığı görülmektedir, Şekil 2(b). Ampirik denklemlerin doğruluğunun artırılması için bu hız aralığında  $L/D=15$  için deneysel veri elde edilmesi gerekmektedir.  $L/D=20$  için ise Anderson [14] tarafından verilen Denklem 3 deneysel verileri 1500m/s altında kalan çarpma hızları için yeterli doğrulukta hesaplayabilirken bu hızın üzerinde delme değerlerini gerçek test verilerinden düşük olarak hesaplamaktadır, Şekil 2(c). Silsby ve arkadaşları tarafından verilen Denklem 4 ise  $L/D=20$  ve üstü üzerindeki çap boy oranlarını ise yeterli doğrulukta tahmin ettiği görülmektedir. Şekil 2 (c) ve (d).

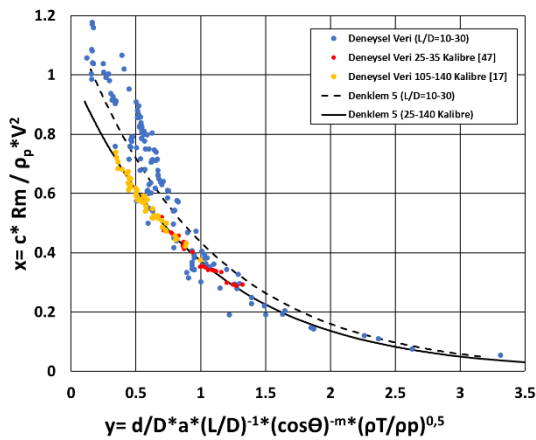


Şekil 2.  $P/L$  değerlerinin çarpma hızına göre değişimi a)  $L/D=10$ , b)  $L/D=15$ , c)  $L/D=20$  ve d)  $L/D=10-30$  değerleri için.

Figure 2.  $P/L$  results based on impact velocity for  $L/D$  values of a) 10, b) 15, c) 20 and d) 10-30.

### 3.2. Lanz-Odermat Ampirik Denklemleri

Lanz-Odermat denklemi 25-140 mm kalibreye sahip uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA üzerindeki delme derinliğinin belirlenerek zırh-çelik eşlenik kalınlığının belirlenmesi amacıyla zafiyet analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. 25-140 mm kalibre uzun çubuk tipi penetratörler için oluşturulan Denklem 5, RHA hedefler üzerindeki penetrasyonu yüksek doğruluk ile hesaplamaktadır, Şekil 3. Lanz-Odermat'ın yaptığı çalışmada ortaya koyduğu Denklem 5, 25-140 mm kalibreli uzun çubuk tipi tehditlerin RHA hedef üzerindeki penetrasyonunu %5-6 hata oranı ile belirlemektedir [17].



Şekil 3. Denklem 5 sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırma.

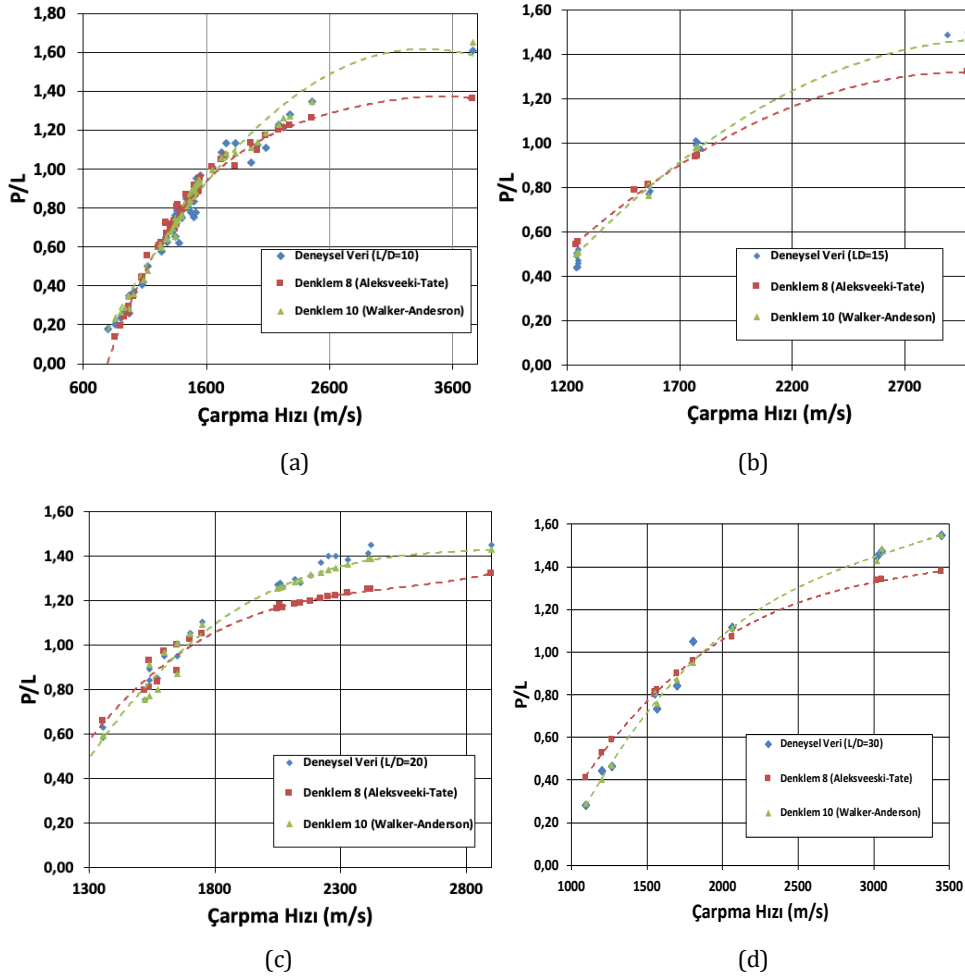
Figure 3. Comparison of Equation 5 with experimental results.

Bu çalışma kapsamında boy çap oranı  $L/D=10-30$  arasında değişen uzun çubuk tipi Tungsten penetratörlerin RHA üzerindeki delme derinliklerinin Denklem 5 ile elde edilen değerlerine bakıldığında ise hedef üzerindeki penetrasyon davranışının hesaplanmasının deneysel veri ile uyuşmadığı görülmektedir. Özellikle  $L/D=10$  olan uzun çubuk tipi penetratörlerin delme derinliklerini için deneysel veri ile hesaplanan değerleri arasında ortalama %14 oranında hata hesaplanmıştır.

Bu açıdan bakıldığında Tablo 1'de oluşturulan veri grubu için Denklem 5'in yeterli hesaplama kapasitesine sahip olmadığı ortaya çıkmaktadır.

### 3.3. Aleksveeskii-Tate ve Walker-Anderson Analitik Yöntemleri

Aleksveeskii-Tate ve Walker-Anderson analitik modelleri için Python programı kullanılarak zamana bağlı çözüm yapan kodlar yazılmıştır. Hesaplamalar Tablo 1 kapsamında oluşturulan test kütüphanesi içerisinde yer alan her bir veri noktası için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te  $L/D=10-30$  oranına sahip deliciler için çarpma hızına bağlı olarak verilmiştir. Literatüre bakıldığı zaman geniş  $L/D$  değer aralıkları için analitik modellerin karşılaştırmaları çok kısıtlı kalmaktadır.  $L/D=10$  oranına sahip uzun çubuk tipi penetratörlerin analiz sonuçları, deneysel verileri ile karşılaştırıldığında 1000m/s çarpma hızlarına kadar Aleksveeskii-Tate modeli deneysel verilere göre penetrasyon derinliklerini daha yüksek hesaplamaktadır. Bunun yanında  $L/D=10$  için Aleksveeskii-Tate modeli kullanılarak yapılan hesaplamalarda uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA hedef üzerine 2500m/s ve üstündeki yüksek çarpma hızlarında test değerlerinin hesaplanan değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.** Deneysel ve Analitik Modellerin  $P/L$  değerlerinin çarpma hızına göre değişimi a)  $L/D=10$ , b)  $L/D=15$ , c)  $L/D=20$  ve d)  $L/D=10-30$  değerleri için.

**Figure 4.**  $P/L$  results of Experimental and Analytic Model based on impact velocity for a)  $L/D=10$ , b)  $L/D=15$ , c)  $L/D=20$  ve d)  $L/D=10-30$  values.

Benzer durum  $L/D=15$  olan uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA hedef üzerindeki penetrasyonu için de geçerlidir, Şekil 4(b).  $L/D$  değeri arttıkça Aleksveeski-Tate analitik modelinde yaklaşık 2000 m/s üzerindeki hızlarda hesaplama doğruluğunun düştüğü belirlenmiştir.

Aleksveeski-Tate modelinden farklı olarak Walker-Anderson modeli ise tüm çarpma hızlarında Tungsten uzun çubuk tipi penetratörün RHA hedef üzerinde oluşturduğu penetrasyon davranışını tüm  $L/D$  değerleri için yüksek doğrulukla hesaplayabildiği görülmektedir, Şekil 4(a-d).

Ampirik denklemler ve analitik modellemeler sonucunda hesaplanan Tungsten uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA hedef üzerinde oluşturdukları delme derinlikleri deneysel veriler ile hata oranı açısından karşılaştırılması yapılmıştır, Tablo 3. Sayısal olarak bakılınca ampirik denklemler  $L/D=10$  ve 20 için %5 değerinden az bir hata ile hesaplanmaktadır. Fakat  $L/D=15$  için literatürde verilen Denklemler 2 %14 gibi yüksek bir hata ile delme derinliklerini hesaplayabilmektedir. Gerek  $L/D=15$  gerek  $L/D=20$  için bu çalışma kapsamında tanımlanan Denklemler 12 ve 13 literatürde verilen ampirik denklemlerden daha düşük hesaplama hatasına sahiptir. Silsby ve arkadaşları, [37] tarafından gerçekleştirilen çalışmada hesaplama hatası tüm  $L/D$  oranları için %8 iken, yeni veri gruplarının eklenmesi ile tüm  $L/D$  değerleri için %9 değerine ulaşmıştır.

**Tablo 3.** Hata oranları (%).

**Table 3.** Error ratio (%).

L/D		10	15	20	30
Ampirik Denklemler	1	2,9			
	2		14		
	3			4,6	
	4			9	
	12		5,1		
	13			2,8	
Analitik Modeller	8	5	7	8,8	13,7
	10	2,9	2,4	3	3,3

Analitik penetrasyon modellerinde ise Aleksveeski-Tate modelinin hata oranı genel olarak ampirik denklemlerden yüksektir. Ayrıca  $L/D$  değerinin artmasıyla hata oranlarının yükseldiği kaydedilmiştir. Walker-Anderson penetrasyon modelinde ise  $L/D$  değerlerinin artması ile hata oranlarında artış gözlenmemiştir. Bu neden ile Walker -Anderson modeli zırh

yapılarının zafiyet hesaplamalarında hassas sonuçlar elde edilmesini sağlayacağı belirlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Literatürdeki Tungsten uzun çubuk tipi penetratörlerin RHA zırh çelikleri üzerindeki L/D oranı ve çarpma hızı değişkenlerine bağlı olarak delme derinliği bilgileri toplanmış ve 150 farklı veri noktasından oluşan deneysel veri grubu oluşturulmuştur. Bunun yanında farklı L/D oranları için ampirik denklemler ile elde edilen delme derinlikleri test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca analitik penetrasyon modelleri için zamana bağlı çözümlene yapabilen bilgisayar kodu yazılarak benzer şekilde veri grubundaki L/D ve çarpma hızları kullanılarak delme derinlikleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Tungsten malzemeden üretilmiş uzun çubuk penetratörlerin RHA hedef üzerindeki delme derinlikleri Walker-Anderson penetrasyon modeli ile en yüksek doğrulukla hesaplanmıştır. Aleksiveeski-Tate penetrasyon modelinde ise hesaplanan penetrasyon değerleri ile deneysel veriler arasındaki farkın, L/D değeri ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında ampirik denklemler de belirli çarpma aralıklarında ve belirli L/D oranlarında yine yüksek doğruluk oranında hesaplama yapılmasına izin vermektedirler. Ayrıca, Lanz-Odermat ampirik denklemi ile hesaplanan değerler bu çalışma kapsamında ele alınan test sonuçları için en düşük doğruluk değerlerine sahiptir. Özellikle ampirik denklemlerin yarı sonu hedefler üzerindeki delme derinliklerinin hesaplanmasında kullanılması esnasında deneysel verilerdeki eksik hız noktalarının tamamlanması gerekmektedir.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Awerbuch, J. and Bodner, S. R. 1974. Analysis of The Mechanics Of Perforation Of Projectiles In Metallic Plates, Int. J. Solids Struct., Cilt.10, s.671-684, DOI:10.1016/0020-7683(74)90050
- [2] Lehr H. F, Wolmand E. 2001. On The Optimal Performance Of Long-Rod Penetrators Subjected To Transverse Accelerations, International Journal of Impact Engineering, Cilt.26, s.409-420, DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00091-4
- [3] Reis I., Teixeira-Dias F., Dias-de-Oliveria J., S.2023 Optimisation Strategies for Multi-Layered Armor Plates, International Journal of Modelling and Simulation, s.1-22, DOI: 10.1080/02286203.2023.2167505
- [4] Lanz W., Odermatt W., Weihrauch G., S. 200, Kinetic Energy Projectiles: Development History, Satet of The Art, Trends. International Symposium on Ballistics, 7-11 May 2001, 1191-1198
- [5] Rosset, W.S., S.2001, An Overview of Novel Penetrator Technology, ARL-TR-2395, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, s. 1-30
- [6] Balos S., Nikacevic M., Ristic P., Sidanin L. S.2010. Jacketed Long-Rod Penetrators: Problems and Perspectives, Scintific Technical Review, Cilt.60, s.70-75
- [7] Keele M.J., Rapacki E.J., Bruchey W.J., S.1991. High Velocity Performance of A Uranium Alloy Long Rod Penetrator, BRL-TD-3236, US Armu Ballistic Research Laboratory, s.1-24
- [8] Bjerke T.W., Silsby G.F., D.R. Scheffler, Mudd R.M., S. 1992. Yawd long-rod armor penetration. International Journal of Impact Engineering, Cilt.12, s.281-292. DOI:10.1016/0734-743X(92)90473-7.
- [9] Anderson C. E., Behner T., Hohler V., S.2013. Penetration as a Function of Target Obliquity and Projectile Pitch. Journal of Applied Mechanics. Cilt.80, s.1-11. DOI: 10.1115/1.4023342
- [10] Yarin A.L., Rubin M. B., Roisman I.V., S.1995, Penetration of a Rigid Projectile Into An Elastic-Plastic Target of Finite Thickness. International Journal of Impact Engineering. Cilt.16. s.801-831. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00019-7.
- [11] Leonard W. S.1997. The Effect of Nose Shape on Depleted Uranium (DU) Long-Rod Penetration. ARL-TR-1505. Army Resarch Laboratory. Aberdeen Proving Ground.
- [12] Wilson L.L., Foster J.C., Jones S.E., Girillis P. S.1989. Experimental Rod Impact Results. International Journal of Impact Engineering. Cilt.8, s.15-25. DOI: 10.1016/0734-743X(89)90028-6.
- [13] Anderson C. E., Walker J.D. S.1991. An Examination of Long Rod Penetration, International Journal of Impact Engineering. Cilt.11, s.481-501. DOI: 10.1016/0734-743X(91)90015-8.
- [14] Anderson C. E., Walker J.D., Bless S.J., Partom Y. S.1996. On the L/D effect for Long-Rod Penetrators. International Journal of Impact Engineering. Cilt.18, s.247-264. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00028-9.
- [15] Alekseevskii V. P, S.1966, Penetration Into A Target At High Velocity, Combustion, Explosion and Shock Waves, Cilt.2, s.99-106. DOI: 10.1007/BF00749237.
- [16] Tate A., S. 1967. A Theory For The Deceleration of Long Rods After Impact, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Cilt.15, s.387-399. DOI: 10.1016/0022-5096(67)90010-5.
- [17] Lanz W., Odermatt W., S.1992. Penetration Limits of Conventional Large Caliber Anti-Tank Guns/Kinetic Energy Projectiles. 13. International Symposium on Ballistics, 1-3 June 1992, 225-233
- [18] Huang F., ZHANG L., S.2007. Investigation on Ballistic Performance of Armor Ceramics Against Long-Rod Penetration. Metallurgical And Materials Transactions A, Cilt.38A. s.2891-2895. DOI: 10.1007/s11661-007-9281-8
- [19] Goh W.L, Zheng Y., Yuan J., Ng K.W. S.2017. Effects of Hardness of Steel on Ceramic Armour Module Against Long Rod Impact. International Journal of Impact Engineering. Cilt.109, s.419-426. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.08.004.
- [20] Luo D., Wang Y., Wang F., Cheng H., Zhu Yu.S.2019. Ballistic Behaviour of Oblique Composite Structure Against Long-Rod Tungsten Projectiles. Materias, Cilt.12, s.1-13. DOI: 10.3390/ma12182946
- [21] Goh W., Luo B. Zeng. Z, Yuan J. Kee Woei Ng. S.2019. Effect of Hardness and Toughness of Ceramic Armour Module Against Long-Rod Impacts. 42nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Cilt.39, s.185-198. DOI: 10.1002/9781119543343.ch18
- [22] Fellows N.A., Barton P.C. S.1999. Development of Impact model for Ceramic-faced Semi-infinite Armour. International Journal of Impact Engineering, Cilt.22, s.793-811. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00017-2
- [23] Tate A.K. Green E.B., Chamberlain P. G., Baker R. G. S. 1978. Model Scale Experiments on Long Rod Penetration. 4th International Symposium on Ballistics, 17-19 Ekim 1978, Monterey, Kanada.
- [24] Magness, L.S. Farrand T. G. S.1990. Deformation Behaviour and Its Relationship to the Penetration Performance of High Density KE Penetrators Material. Army Scence Conference, Durham, NC.
- [25] Hohler, V., Schneider E., Stilp A. J., Tham R. S.1978. Length- and Velocity Reduction of High Density Rods Perforating Mild Steel and Armor Steel Plates. 4th International Symposium on Ballistics, 17-19 Ekim 1978, Monterey, Kanada.
- [26] Hohler, V. Stilp A. J. S.1977. Penetration of Steel and High Density Rods in Semi-Infinite Steel Targets. 3rd International Symposium on Ballistics, 23-25 Mart 1977, Karlsruhe, Almanya.
- [27] Hohler, V. Stilp A. J. S.1984. Influence of the Length-to-Diameter Ratio in the Range from 1 to 32 on the Penetration Performance of Rod Projectiles. 8th International Symposium on Ballistics, , 23-25 Ekim 1984. Orlando, Amerika
- [28] Hohler, V., Stilp A. J. S.1987. Hypervelocity Impact of Rod Projectiles with L/D from 1 to 32. International Journal of Impact Engineering, Cilt.5, s.323-334, DOI: 10.1016/0734-743X(87)90049-2.
- [29] Sentil P.P., Reddy, P.R., Reddy, T.S., Kumar, K.S., Madhu, V., S.2019. Scaled WHA Long Rod Projectile Impact Against Armour Steel. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, Cilt.3, s.1-8. DOI: 10.1007/s41314-019-0018-4.
- [30] Freuh, S., Heine, A., Weber, K.E., Wickert, M. S.2016. Effective depth-of-penetration range due to hardness variation for different lots of nominally identical target material. Defence Technology. Cilt.12, s.171-176. DOI:10.1016/j.dt.2015.10.002.
- [31] Sorensen B.R., Kimsey K.D., Silsby G. F., Scheffler D.R., Sherrick T. M, De Rosset W. S. 1991. High Velocity Penetration of Steel Target. International Journal of Impact Engineering, Cilt.11, s.107-119, DOI: 10.1016/0734-743X(91)90034-D
- [32] Fras T. S.2021. Experimental and numerical Study on a Non-Experimental Ractive Armour with the Rubber Interlayer Applied Against Kinetic Energy Penetrators-The 'Bulging Effect' Analysis. Materials, Cilt.14, s.1-17. DOI: /10.3390/ma14123334
- [33] Anderson C.E., Royal-Timmons S. A., S.1997. Ballistic Performance of Confined 99.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Tiles, International Journal of Impact Engineering, Cilt.19, s. 703-713, DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00006-7
- [34] Woolsey, P., Mariano, S., Kokidko, D. S.1989. Alternative Test Methodology for Ballistic Performance Ranking of Armor Ceramics



- Report No. MTL TR 89-43, U. S. Army Materials Technology Laboratory, Watertown, Massachusetts.
- [35] Woolsey, P., Mariano, S., Kokidko, D. S.1990. Progress Report on Ballistic Test Methodology for Armor Ceramics. Proceedings of TACOM Combat Vehicle Survivability Symposium, Gaithersburg, MD, 15 Mart 1990.
- [36] Gooch, W.A., Burkins, M.S., Ernst, H-J, Wolf T. S.1995. Ballistic Penetration of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. Lightweight Armor Systems Symposium'95, The Royal Military College of Science, Shrivenham, İngiltere, 28-30 Haziran 1995
- [37] Silsby G. F., S.1984. Penetration of Semi-Infinite Steel Targets by Tungsten Long Rods at 1.3 to 4.5km/s. 8th.International Symposium on Ballistics, 23-25 Ekim 1984,Florida, 669-673
- [38] Yuan, J., Tan, E.B., S.2014. An Examination of DOP Test of Ceramic Tile Subjected to Long Rod Penetration. Applied Mechanics and Materials . Cilt.566. s. 353-358. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.566.353.
- [39] Walters, W., Williams, C., S.2005. A Solution of the Alekseevski-Tate Penetration Equations. ARL-TR-3606. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground. s.1-50
- [40] Zhang, D., Li, J., Wei, X., Feng, K., Wang, Yu, Zhao, J., Xue, D., S.2020. Research on Dynamic Test of Hyper-Velocity Impact Penetration Acceleration Signal. IEEE, Cilt.8, s.194879-194893. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033676
- [41] Lan, B., Wen, H., S.2010. Alekseevskii-Tate revisited: An extension of the Modified Hydrodynamic Theory of Long Rod Penetration. Science China Technological Sciences. Cilt.53, s.1364-1373. DOI: 10.1007/s11431-010-0011-x
- [42] Jiao, W.J., Chen, X.W., S.2018. Approximate Solutions of the Alekseevskii-Tate Model of Long Rod Penetration. Acta Mech.Sin. Cilt.34, s.334-348. DOI: 10.1007/s10409-017-0672-9.
- [43] Lou, J., Zhang Y., Wang, Z.,Hong, T., Zhang, X., Zhang S., S.2014. Long-Rod Penetration: The Transition Zone Between Rigid and Hydrodynamic Penetration Models. Defence Technology. Cilt.10. s.239-244. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.007
- [44] Zhiyong, Y., Chen, X. S.2021. Analysis of Characteristic Parameters of Long-Rod Penetration. Explosion and Shock Waves. Cilt.41, s.1-7. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0057
- [45] Jeanquartier R., Odermatt W. S.1995. Post Perforation Length and Velocities of KE Projectiles with Single Oblique Targets. 15<sup>th</sup> International Symposium on Ballistic. 21-24 Mayıs 1995, Kudüs, s.1-8.
- [46] Auten, J. R. S. 2011. A Comparison of Penetration Algorithms: Predictions vs. Test Data For Kinetic Energy Rods, 26th International Symposium On Ballistics, 12-16 Eylül 2011, Miami , s.1522-1533
- [47] Tate, A. S.1969. Further Results In The Theory of Long Rod Penetration, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Cilt.17, p 141-150. DOI:10.1016/0022-5096(69)90028-3.
- [48] MIL-DTL-12560K, S.2013. Armor Plate , Steel Wrought, Homogeneous (For Use In Combat-Vehicles And For Ammunition Testing).
- [49] Walker, J.,Anderson, C. E. J. S. 1995. A Time-Dependent Model For Long-Rod Penetration. International Journal of Impact Engineering, Cilt.16, s.19-48. DOI: 10.1016/0734-743X(94)00032-R.
- [50] Walker, J.,Anderson, C. E. J. S. 1998. Penetration Modelling of Ceramic and Metal Targets. 36<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting&Exhibit. 12-15 Ocak 1998, Reno, s.1-7