Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

Research Paper

Assessment of the Arrowhead Impact on Armor Using the Finite Element Method (FEM): A Case Study of Iron Age II and III Arrowheads from the Qareh Tepe Segzabad Cemetery

Soroush Jalili[1], Mostafa Dehpahlavan[2,*]

[1] Master's Graduate student in Archaeology, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2] Associate Professor, Department of Archaeology, Faculty of Literature and Humanities, University of Tehran, Tehran, Iran.
* Correspondence: mdehpahlavan@ut.ac.ir

Abstract

Upon the arrival of the first millennium BCE and the growing prominence of archery in the armies of the Near East, the number of arrowheads discovered in Iron Age cemeteries, settlements, and fortifications in the western Iranian Plateau and adjacent areas increased. Alongside this increase, diverse and sometimes novel forms, such as socketed trilobate arrowheads, appeared in the region, which cannot be considered a normal characteristic for a highly consumed weapon like the arrow. The reason for this diversification can provide significant insights into weapon engineering and design capabilities during this period. Therefore, using the Abaqus simulation software based on the Finite Element Method, an experiment was designed to reconstruct the performance of the weapons of that period under various conditions. To this end, three distinctive bronze arrowhead types from the findings of the 2015 and 2016 excavations at the East Cemetery of Qareh Tepe Segzabad, and one type from the findings at Persepolis, were selected. A total of 16 simulated firings against two common defensive coverings of this period—scale armor and linen armor—were studied. The selected types were tested at distances of 7.5, 15, and 30 meters across two different terminal velocity ranges from angular bows (63.2−74.2 m/s) and B-shaped bows (64.3−75.4 m/s). Based on the results, by considering perforation ability as the criterion for assessing the arrowheads in the simulated conditions, the geometric properties of the arrowheads and the mechanical properties of the armor were the determining factors. Thus, only the arrowhead tipped with a pyramidal blade (Badkin) recorded the best efficiency in the perforation process due to its unique form. The other three samples successfully completed the process against linen armor, creating perforations with an area greater than 30 mm², but none posed a serious threat to a soldier equipped with scale armor. It appears from the statistical sample of the selected arrowheads that the small quantity of the pyramidal type compared to the other three, despite its suitable performance against armored targets, likely indicates a lower number of armored soldiers and targets relative to unarmored forces in the armies of the region, at least until the 6th century BCE.

Keywords: Bronze Arrowhead, Finite Element Method (FEM), Armor, Iron Age, Impact Mechanics.

Received: 2024/1/4
Revised: 2024/12/28
Accepted: 2025/1/2
Published: 2025/6/30

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Introduction

From design to production, technological determinism plays a key role in introducing manufacturing techniques to enhance performance (Ray, 2010). This study examines arrowhead design and performance as indicators of this determinism, addressing their quantitative significance in archaeological findings. A growing diversity of arrowheads, unusual for mass-produced weapons, demands further engineering analysis beyond typological and chronological studies (Hellmuth, 2014; Erdmann, 1973; Cleuziou, 1973; Мелюкова, 1964). While Philip Blyth's 1977 research

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

analyzed Greco-Persian war armor and weapons, and Aldrete's 2013 team reconstructed linen armor (linothorax), these studies overlooked arrowhead geometry's role in impacting and penetrating armor. This research focuses on addressing this gap.

Methods and weaponry of the research

Method

This study uses FEM simulations under controlled, non-realistic conditions to analyze complex physical interactions. ABAQUS software was selected for its precision in calculating forces, stress, and strain during impacts. Simulations modeled close combat, measuring the time interval from impact to motion stoppage.

Weaponry

Arrowheads were selected based on typology, chronology, and archaeological context to ensure test reliability. Four types were analyzed: Tanged Pyramidal (B), Tanged Bilobate with leaf-shaped blade (L), Bilobate with rhombus blade (R), and Socketed Trilobate (T). Arrowheads B and L were linked to Iron Age II burials(Dehpahlavan, 1395), while T was associated with Iron Age III (Dehpahlavan, 1398)(Figure 1). Effectiveness was tested against scale armor (S.A.) and linen armor (L.A.), commonly used in the ancient Near East (Aldrete et al., 2013)(Figure 3).

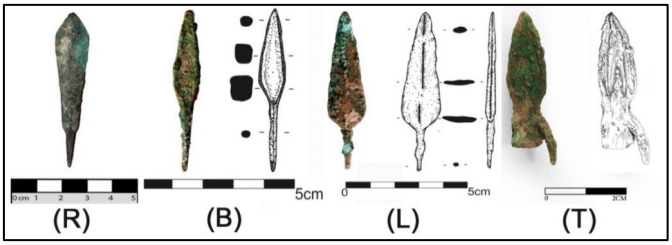


Figure 1. Tested arrowheads: (B). Tipped with pyramidal blade (Badkin), (L). Double-edge tipped with a leaf-shaped blade, (T). Trilobate socket with thorns on the socket, (R). Tipped with two edges with rhombic blade form.

The software inputs related to the bow are kinetic energy and initial speed. The choice of angular and B-shaped bows is based on archaeological validity and research (Zutterman, 2003). An angular bow of approximately 150 cm in length generates an initial kinetic energy of about 40.9 J (Bergman, 1988), while the B-shaped bow ranges between 18 and 36 J (Blyth, 1977).

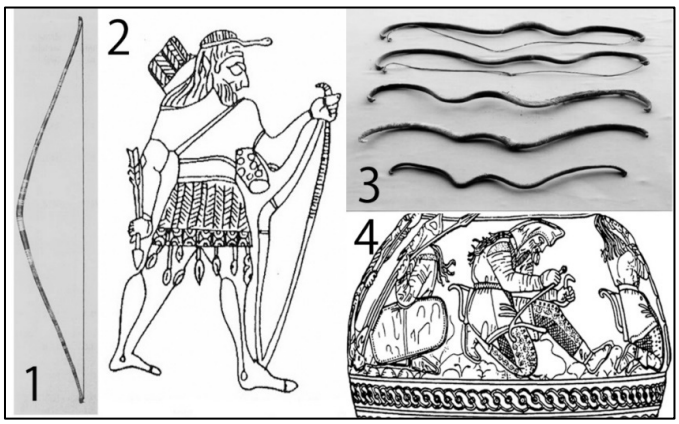


Figure 2. Selected bows for simulation: 1- reconstructed angular bow (Bergman et al, 1988) 2- Archer depicted holding an angular on a Hasanlu gold bowl (Winter, 1989) 3- B-shaped bows found in Yanghaii cemetery in China (Selby, 2005) 4- Scythian archer loading his B-shaped bow with an arrow depicted on the gold Kul oba bowl (Roll, 1989).

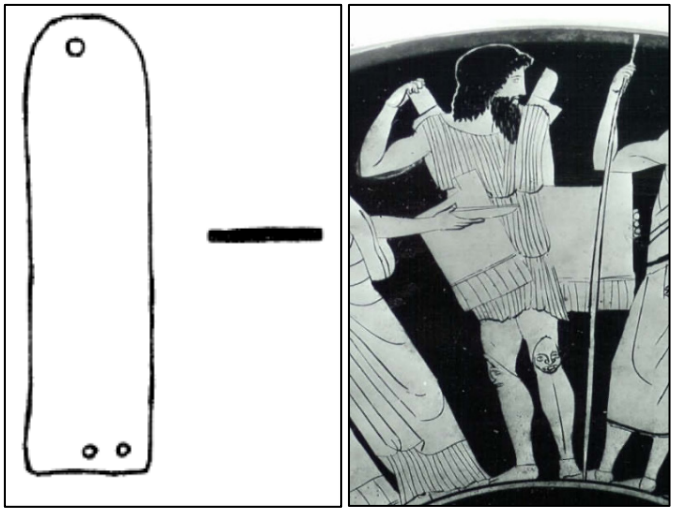


Figure 3. Left: a bronze scale plate of the scale armor (S.A)(Stronach, 1958); Right: wearing a linen armor, painting on an Attic vase (Aldrete et al, 2013)

Modeling

The arrowheads were initially designed in CATIA's environment (Sketch). Once this step was completed, the designs were input into ABAQUS software. Due to the geometry and bulkiness of the samples, the free meshing method and the pyramidal tetrahedral species (C3D4) of the Tet family components were used to achieve better results (Figures 4 & 5).

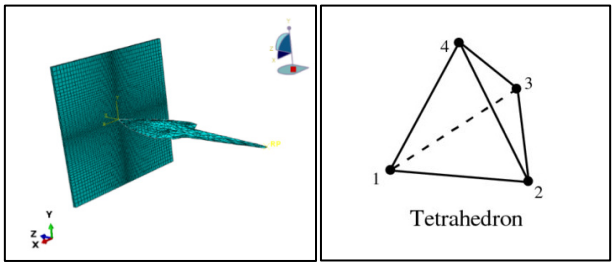


Figure 4. Right. The element of the pyramidal quadrilateral type (C3D4), Left. The sample of the mesh-free model of the impact process in Abaqus software

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

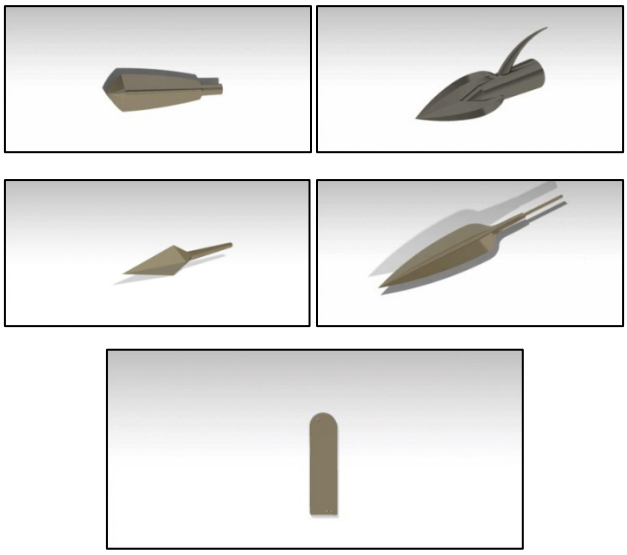


Figure 5. Simulated weapons in Abaqus software.

Material properties (bronze, leather, linen) were entered into the software, and four simulations were conducted per arrow: angled bow against scale and linen armor (A.B-S.A., A.B-L.A.), and B-shaped bow against the same targets (B.B-S.A., B.B-L.A). The main results are summarized in Table 1.

Results and Discussion

The effectiveness and performance of arrowheads

The impact process involves simultaneous deformation of armor and projectile, transitioning from elastic to plastic states, characterized by the von Mises stress criterion and Johnson-Cook's ductility formula (Johnson & Cook, 1985). Most armor and arrowheads transitioned to plastic deformation, except model B (A.B-L.A., B.B-L.A.) and model L (A.B-L.A.). Maximum plastic deformation occurred in the A.B-S.A. mode, with 14.5 mm for armor and 13 mm tip bending for the L model. Failure modes observed include plugging (Borvik et al., 2001), petaling (Wierzbicki, 1999), and perforation (Dean et al., 2009). Model T exhibited the most failures, losing its tip under +4.159e+02 MPa stress. Only model R in B.B-S.A. did not fail. Detailed stress results are provided in Figures 6 through 9.

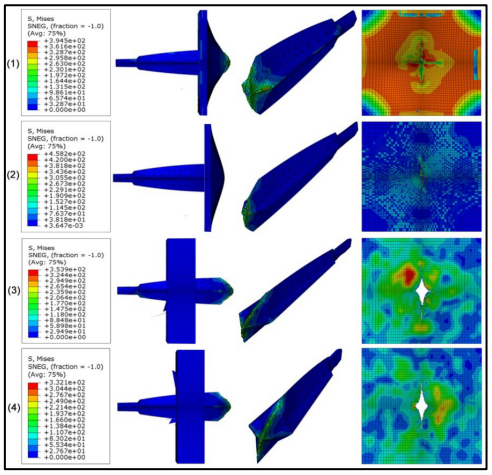


Figure 6. The stress charts of model R at the impact in: (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state

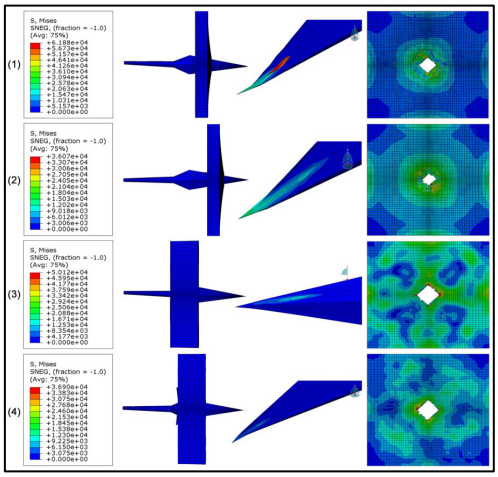


Figure 7. The stress charts of model B at the impact in: (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state.

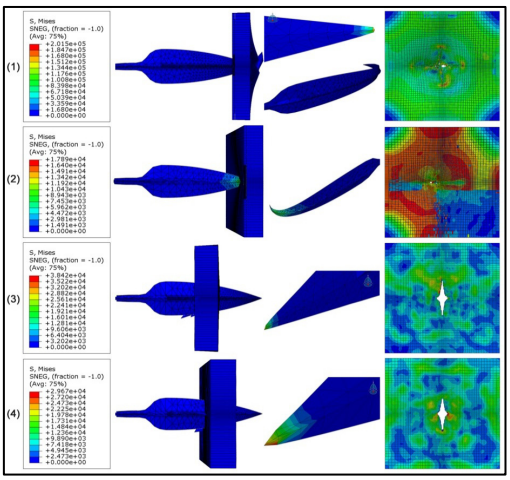


Figure 8. The stress charts of model L at the impact in (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

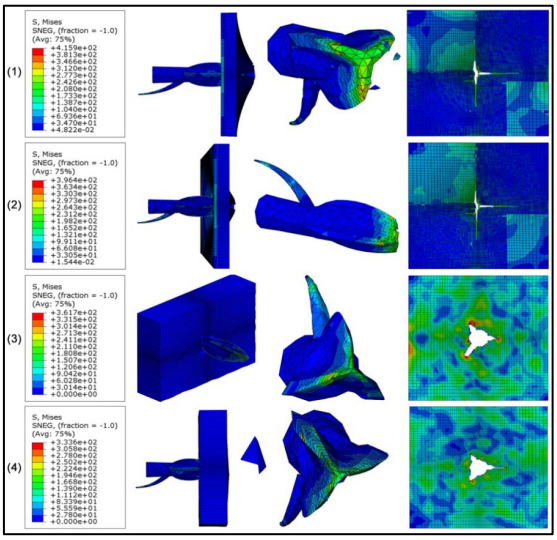


Figure 9. The stress charts of model T at the impact in (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state.

Table 1. Results and simulation time for each arrowhead

Simulation Time /Penetration Results								
T		L		B		R		States
462 min	12.76 mm	352 min	13.1 mm	453 min	22.79 mm	355 min	14.5 mm	**A.B-S.A**
350 min	17.4 mm	344 min	Complete passage	283 min	Complete passage	331 min	Complete passage	**A.B-L.A**
355 min	12.66 mm	359 min	10.83 mm	479 min	17.74 mm	350 min	9.52 mm	**B.B-S.A**
232 min	12.1 mm	279 min	Complete passage	230 min	Complete passage	345 min	Complete passage	**B.B-L.A**

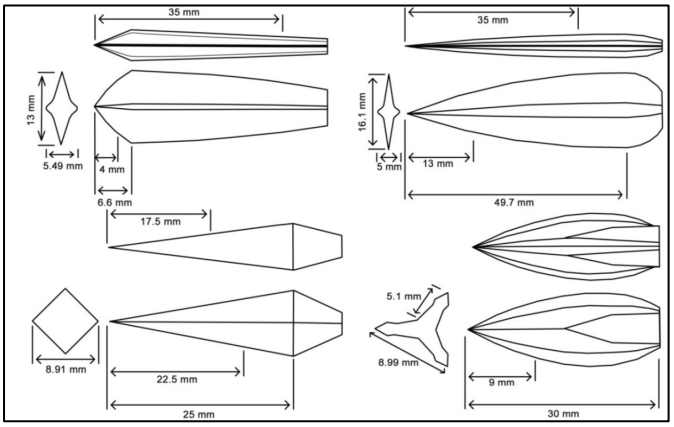


Figure 10. Geometrical properties of models

Scale armor resisted perforation from R, L, and T arrowheads, whereas linen armor failed under all conditions, reaching its stress limit (+5.012e+04 to +3.321e+02 MPa). Factors affecting ballistic limits include absorbed energy, velocity loss, projectile tip geometry, and target thickness (Gupta et al., 2006; Tan et al., 2003; Borvik et al., 2002). Scale armor absorbed 90.8% of energy and 78.5% of velocity, compared to linen armor's 32.05% and 35%. Linen armor, despite greater thickness, proved more vulnerable, with over 35 mm perforation area per arrowhead. Model B performed best, successfully perforating armor in all modes. Tables 2 visualize energy absorption trends. Table 3 and Figure 10 also show the geometrical properties of projectiles during the impact.

Table 2. The calculated amounts of velocity and energy absorbed by models

	$v_i(^M/_S)$	v_r	v_{bl}	E_a(J)
$\mathbf{R_{A.B-S.A}}$	63.7	25.8 - 14.1	37.9 – 49.6	30.7 – 35.1
$\mathbf{B_{A.B-S.A}}$	65	20.6 - 11.3	44.4 – 53.7	32.2 – 34.77
$\mathbf{L_{A.B-S.A}}$	61	37.2 - 29.2	23.8 – 31.8	23.4 – 28.7
$\mathbf{T_{A.B-S.A}}$	70	35 - 17.1	35 – 52.9	27.1 – 33.8
$\mathbf{R_{B.B-S.A}}$	54.3	28.5	25.8	20.1
$\mathbf{B_{B.B-S.A}}$	56	16.09 - 8	39.91 - 48	25.3 - 27
$\mathbf{L_{B.B-S.A}}$	52.8	32.8	20	18
$\mathbf{T_{B.B-S.A}}$	61	35 - 27	26 - 34	18.3 - 21.9
$\mathbf{R_{A.B-L.A}}$	63.7	58.3	5.4	5
$\mathbf{B_{A.B-L.A}}$	65	29.1	35.9	28.7
$\mathbf{L_{A.B-L.A}}$	61	60	1	1.2
$\mathbf{T_{A.B-L.A}}$	70	58.3	11.7	11.3
$\mathbf{R_{B.B-L.A}}$	54.3	50	4.3	4.2
$\mathbf{B_{B.B-L.A}}$	56	28.3	27.7	20.7
$\mathbf{L_{B.B-L.A}}$	52.8	50	2.8	3.5
$\mathbf{T_{B.B-L.A}}$	61	48.3	12.7	10.2

Table 3. Geometrical properties of models

Models	Maximum cross-sectional area(mm^2)	A.B-S.A & B.B-S.A States		A.B-L.A & B.B-L.A States	
		In the action c.s area(mm^2)	Tip length involved(mm)	In the action c.s area	Tip length involved
R	≤35.9	≤13.5	4	≤35.9-8.7	35
B	39.6	1.12-30.5	22.5	16.8	17.5
L	≤40.2	≤2.7	13	≤4.9	35
T	≤38.3	≤19.1	9	≤28.2	30

Depth of penetration and lethal damage

When evaluating the impact of an arrow that causes serious injury or death, it passes through four key layers: armor, the deformation of the armor, clothing or coverings underneath the armor, and finally, the skin. According to Bleetman and Dyet's research, the thickness of the skin and its distance from critical organs, such as the spleen, liver, kidneys, and lungs, are different; the average minimum thickness is 16 mm, while the maximum is 31 mm (Bleetman & Dyet, 2000).

Penetration depth estimates for serious injury are 28.2 mm for scale armor and 29 mm for linen armor. Model B achieved 22.79 mm penetration in scale armor but exceeded 40.1 mm in

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

linen armor, highlighting linen armor's limitations. Scale armor demonstrated superior defense against injury.

Conclusion

Type B arrowheads outperformed others, demonstrating the influence of geometry on efficiency. However, archaeological evidence suggests a heterogeneous relationship between technological determinism and arrowhead success. Despite inferior performance, types R, L, and T are more prevalent in findings, suggesting limited effectiveness against armored armies. Arrowheads likely served other purposes, such as hunting or targeting light infantry. Scale armor's rarity before the 6th century BC supports this hypothesis, as equipping fully armored armies was expensive. Lighter weaponry appears to have been more common, corroborated by the scarcity of armor artifacts. The presented tables and figures further validate these conclusions.

Author Contributions: All authors contributed to the preparation and writing of the manuscript.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors would like to express their sincere appreciation to the Department of Mechanical Engineering at the University of Tehran, particularly Dr. Alireza Daneshmehr and his students, for performing the simulation process and for their assistance during various stages of data analysis.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

پژوهه باستان سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

مقاله پژوهشی

سنجش فرآیند برخورد سرپیکان به زره با روش (FEM) اجزاء محدود مطالعه موردی: سرپیکان‌های عصر آهن II و III گورستان قره تپه سگزآباد

سروش جلیلی[۱]، مصطفی ده پهلوان[۲]*

۱. دانش آموختهٔ کارشناسی ارشد باستان شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه باستان شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
* مسئول مکاتبات: mdehpahlavan@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴
آخرین اصلاح: ۱۴۰۳/۱۰/۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳
انتشار: ۱۴۰۴/۴/۹

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

چکیده

با ورود به هزارهٔ نخست پ.م و پررنگ‌تر شدن کمانداری در ارتش‌های خاورنزدیک، شمار سرپیکان‌های کشف‌شده در گورستان‌ها، استقرارگاه‌ها و استحکامات عصر آهنی در غرب فلات ایران و مناطق همجوار افزایش یافت. در کنار این افزایش، فرم‌های گوناگون و گاهاً نوظهور همچون سه پرهٔ سوکتی در منطقه پدیدار می‌شوند که نمی‌تواند برای سلاح پرمصرفی چون تیر ویژگی عادی تلقی شود، و چرایی آن می‌تواند درک مهمی از قابلیت‌های مهندسی و طراحی جنگ افزار در این دوره را در اختیار قرار دهد. از این‌رو با استفاده از نرم افزار شبیه سازی آباکوس بر پایه روش اجزاء محدود، آزمونی طراحی شد که بازسازی عملکرد سلاح‌های آن دوره را در شرایط گوناگون امکان‌پذیر می‌سازد. بدین منظور سه گونهٔ شاخص سرپیکان برنزی از یافته‌های کاوش‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ گورستان شرقی قره تپهٔ سگزآباد، و یک گونه نیز از یافته‌های تخت جمشید انتخاب شدند. در مجموع ۱۶ تیراندازی شبیه‌سازی شده به دو پوشش دفاعی مرسوم در این دوره، زره پولکی و کتانی در دو بازهٔ سرعت نهایی متفاوت از کمان‌های زاویه‌دار (۷۴/۲ – ۶۳/۲ m/s) و B شکل (۶۴/۳ تا ۵۴/۷ m/s) در فواصل ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ متری گونه‌های منتخب مورد مطالعه قرار گرفتند. براساس نتایج، با در نظر گرفتن توانایی سوراخ‌سازی به عنوان معیار سنجش سرپیکان در شرایط شبیه‌سازی، خواص هندسی سرپیکان و خواص مکانیکی زره، عوامل تعیین‌کننده بودند. به این ترتیب تنها سرپیکان زبانه‌دار با تیغه هرمی به واسطهٔ فرم خاص خود توانست در فرآیند سوراخ‌سازی، بهترین بازده را ثبت کند. سه نمونه دیگر در مقابل زره کتانی موفق به تکمیل فرآیند شدند و سوراخ‌هایی با مساحت بیش از ۳۰۲ mm ایجاد کردند، اما هیچ یک تهدیدی جدی برای سرباز مجهز به زره پولکی به حساب نمی‌آمدند. از جامعهٔ آماری سرپیکان‌های انتخابی چنین بر می‌آید که کمیت اندک گونهٔ هرمی در مقابل سه گونهٔ دیگر، علارغم عملکرد مناسب در برابر اهداف زرهی، احتمالاً می‌تواند بیانگر کم بودن سربازان و اهداف زرهی نسبت به نیروهای غیر زرهی در ارتش‌های منطقه، حداقل تا قرن ۶ پ.م باشد.

واژگان کلیدی: سرپیکان برنزی، اجزاء محدود، زره، عصر آهن، مکانیک برخورد.

۱. مقدمه

بررسی تخصصی سلاح و نظام حاکم بر طراحی و تولید آن در دوران باستان، با تمرکز بر آنالیزهای گونه شناسانه، مقایسه‌ای و بررسی جزئیات در عملکرد آنها، می‌تواند در تفسیر و بازسازی نظام‌های جنگی، تاکتیک‌ها و ماهیت وجودی آثار در بافت باستان‌شناسی بسیار مفید و کارآمد باشد. این رویکرد با عنوان جبرگرایی تکنولوژیکی (Technological determinism) مطرح می‌شود. جبرگرایی به این مفهوم که ابداع یک سلاح نوین بی‌تردید

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

توانایی‌های جدیدی برای کاربر به همراه داشته و طراح و صنعتگر نیز از تکنیک‌های روزآمد تولید بهره می‌گرفته‌اند. اصلی‌ترین معیارِ ارتباط سلاح و تاکتیک، برتری جویی است (Ray, 2010). منطقهٔ خاور نزدیک باستان از اواخر هزارهٔ دوم تا نیمهٔ هزاره نخست پ.م آبستن تحولات و تغییرات بسیاری در حیطه فرهنگ و مهندسی جنگ و جنگ‌افزارسازی بود. شناخت سرپیکان‌های فلزی که از آغاز هزارهٔ دوم پ.م (قرن ۱۸) در مناطق آسیای صغیر، لولنت و سوریه و پس از آن، از حدود قرن ۱۳ پ.م در حوزه‌های مرکزی، شمال، شمال غرب و غرب فلات ایران شاهد رونق‌شان در میان گورآوردها هستیم(Medvedskaya, 1982) می‌توانند از دو جنبه دارای اهمیت باشد: نخست، داده‌های مرجع این پژوهش از میان یافته‌های قره تپهٔ سگزآباد، یکی از محوطه‌های شاخص عصرآهن شمال فلات مرکزی ایران انتخاب شده است. اگر چه این ناحیه از درگیری‌های مهم نیمهٔ نخست هزارهٔ اول پ.م در شمال غرب ایران، بین النهرین و آسیای صغیر دور بوده است و در عین حال وجود حکومت یا خان‌سالاری محلی با ساختار اداری – نظامی متمرکز در این حوزه‌ی فرهنگی – جغرافیایی براساس شواهد موجود مجهول به نظر می‌رسد، ولی یقیناً، این مواد فرهنگی گویای ارتباط با حوزه‌های فرهنگی همجوار (شمال و شمال غرب ایران، لرستان و ایلام) و غیر همجوار (بین النهرین، آسیای صغیر و لوانت) و تأثیرپذیری اقوام مهاجر (سکایی و کیمری) است.

دوم، سرپیکان‌ها در محوطه‌های خاورنزدیک باستان با ورود به هزاره اول پ.م خارج از بافت تدفین (نوشیجان تپه (Curtis, 1984)، زندان سلیمان (Dyson, 1965)، بسطام (Kroll, 1979)، حسنلو (Thornton & Oates, Stronach, 1958)، نیمرود (Dyson, 1965, II; Pigott, 2011; 1960)، لاچیش (Tufnell, 1953)، کارکمیش (Woolley, 1921) و نینوا (Curtis, 2003) و محوطه‌های دیگر) دیده شده و رفته رفته تبدیل به نشانه‌هایی جهت شناسایی و شناخت رویدادهایی چون درگیری و نزاع در گاهنگاری محوطه‌ها می‌گردند (Szudy, 2015).

رشد کمی سرپیکان‌ها در میان یافته‌های باستان‌شناسی این منطقه با به قدرت رسیدن امپراتوری‌های فرامنطقه‌ای مقتدر و حضور اقوام کوچ‌روی اورآسیا و آسیای مرکزی در خاور نزدیک باستان مصادف است. هم سو با افزایش این آثار، شاهد تنوع قابل توجهی در میان آنها هستیم که برای سلاحی مصرفی چون سرپیکان که در کمیت بالا تولید و مورد استفاده بوده عجیب و قابل تأمل است؛ آیا تنوع این سرپیکان‌ها جنبه‌ی برتری جویی و بهبود کارکرد را برای کماندار در مقابل تکنیک‌های دفاعی زمان خود به ارمغان می‌آورده؟ و چقدر این تنوع را می‌توان هم سو با جبرگرایی تکنولوژیکی دانست؟ گوناگونی آثار، موضوع بسیاری از پژوهش‌ها با محوریت گونه‌شناسی، گاهنگاری و بررسی ویژگی‌های قومیتی قرار گرفته است (Мелюкова, 1964; Erdmann, 1973; Cleuziou, 1973; Medvedskaya, 1982; Derin & Muscarella, 2001; Hellmuth, 2008, 2014; Szudy, 2015) ولی هیچگاه به طور خاص چرایی آن از دید مهندسی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

پژوهش‌های تجربی در حیطه‌ی جبرگرایی تکنولوژیکی و مهندسی جنگ در دوران باستان و به طور خاص مقوله‌ی ارزیابی رفتار برخورد سرپیکان به زره، پیشینه‌ی قابل قبولی دارند؛ فیلیپ بلیث (Philip Blyth) در سال ۱۹۷۷ پژوهشی با محوریت مطالعه‌ی جنگ و سنجش روایات تاریخی در دوران هخامنشی را در بسترآزمایشات تجربی با مدل سازی زره‌های یونانی (Cuirass)، کمان پارسی و سکایی و سرپیکان‌ها ی پارسی انجام می‌دهد (Blyth, 1977) که در زمان خود پژوهشی پیشرو به حساب می‌آمد. بلیث با دقت تمام از یافته‌های باستان‌شناسی در کار خود استفاده می‌کند ولی بیشتر تمرکز وی به رفتار زره معطوف شده و در نتیجه‌گیری، تحلیل چندانی از عملکرد پیکان‌ها ارائه نمی‌دهد. پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۲ توسط توماس هالیت (Thomas Hulit) با محوریت شناخت عملکرد زره‌های پولکی با تکیه بر آثار نیمهٔ نخست هزاره دوم پ.م صورت گرفته است (Hulit, 2002). محور این پژوهش نیز تنها شامل معرفی، گونه‌شناسی و بازسازی زره شده و همچنان توجه چندانی به نقش سرپیکان‌ها به عنوان معیار ارزیابی مرغوبیت زره نمی‌شود. پژوهش آخر در سال ۲۰۱۳، توسط گروهی از پژوهشگران دانشگاه جان هاپکینز با سرپرستی گِرگوری آلدرته (Gregory Aldrete) با محوریت زره کتانی یا لینوتُراکس (Linothorax) صورت می‌گیرد (Aldrete, 2013). متأسفانه علارغم بازسازی بی‌نقص زره کتانی، پژوهشگران برای انجام آزمایشات خود در انتخاب سرپیکان‌ها چندان توجهی به شواهد باستان‌شناسی نداشته‌اند. بدین ترتیب فصل مشترک تمامی این مطالعات کمبود تمرکز به نقش سرپیکان و هندسه آن در برخورد و نفوذ به زره بوده است که هدف پژوهش پیش‌رو را شکل می‌دهد. در این پژوهش (FEM) به عنوان ابزاری مفید جهت انجام آزمون انتخاب شده است تا کوچک‌ترین جزئیات در فرآیندهای برخورد و سوراخ‌سازی را در اختیار ما قرار دهد.

۲. روش و ابزار جنگی مورد پژوهش

۲-۱. روش اجزاء محدود

روش معمول در پژوهش‌های تجربی، بازسازی تسلیحات براساس یافته‌ها و توصیفات منابع مکتوب و آزمودنشان در شرایط واقعی است که مطالعات هالیت و آلدرته از این دست هستند. این پژوهش از شبیه‌سازی و مدل سازی در شرایط غیرواقعی بهره گرفته و به نوعی ادامه دهنده و مکمل روش محاسباتی بلیث به حساب می‌آید. (Finite Element Method) یا روش اجزاء محدود[1]، رویکردی نوین برای محاسبه‌ی روابط پیچیده و زمان‌بر

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

فیزیکی است که در صنایع بسیاری کاربرد داشته و در محیط نرم‌افزارهای متعددی به کار گرفته می‌شود که آباکوس یکی از آنهاست.

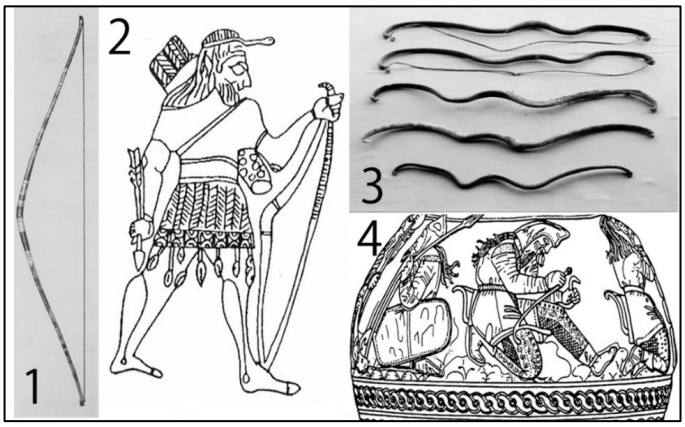
محوریت سرپیکان، خصوصیات و رفتار آن در فرآیند برخورد، ملزوم طرح آزمونی است که بتواند شئ را به عنوان ساختاری هندسی مورد بررسی دقیق و ریز بینانه قرار داد. تحلیل نیروهای وارده، تنش و کرنش در طول فرآیند در آزمون های معمول تجربی بسیار دشوار و هزینه بر می باشد. اجزاء محدود این قابلیت را فراهم می آورد که با تقسیم کردن ساختارهای هندسی با هرگونه ویژگی و پیچیدگی های خاص خود به اجزائی محدود با خواص ساده تر، محاسبات ریاضی زمانبر را کاهش داده و قابلیت تحلیل و بررسی این جزئیات را بالا ببرد. این روش اجازه می دهد تمامی سطح ساختار مورد نظر را همچون بخش داخلی آن بدون آسیب مدل سازی کرد. بدین ترتیب، مطالعه عملکرد بخشهای باقی مانده و از بین رفته در طول فرآیند ها میسر می شود (Hutton, 2004).

اجزاء یا عناصر مجموعه ای را تشکیل می دهند که از معادلات جبر خطی تبعیت می کنند و به صورت معادلات ماتریکسی نشان داده می شوند. این مجموعه عناصر در هر راس به یکدیگر متصل هستند که این اتصلات را گره (Nodes) می خوانند. گره ها ساختار را به مدلی شبکه ای مبدل می کنند که با عنوان مش (Mesh) شناخت می شود. حال با داشتن مش که قابلیت تعریف هرگونه خواص ساختاری و موادی را دارد، می توان تغییر حالت مدل در مواجه با انواع فشار را مشخص کرد(Richmond, 2005).

از همان زمان معرفی و گسترش اولیه خود این روش در مطالعات متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است. از بایو مکانیک (مطالعه ساختار مکانیکی استخوان، پوست، عضلات و ارگانهای دیگر موجودات) گرفته (Hernandez, 2009; Kupczik, 2008; Kupczik, 2009) تا مکانیک جامدات و سیالات، با این حال در حوزه ی باستان شناسی کاربرد اجزاء محدود در حال رشد است. مدل کردن خواص مکانیکی سفال ها (Hein, Kilikoglou, 2002; 2008)، فرآیند تغییرات محوطه ها و آثار غرق شده(O'Shea, 2002; Gibbs, 2006) و همچنین در حوزه ی حفاظت و مرمت (Lubowiecka, 2009; Levy, 2009) شاهد بکارگیری آن هستیم.

۲-۲. شرایط آزمون و ابزارهای جنگی

آزمون پیش رو به گونه‌ای طراحی شده است که نتایج، قابل استناد به مرحلهٔ درگیری نزدیک در نبردها باشند؛ تیرها با دو انرژی جنبشی و سرعت اولیه متفاوت که براساس محاسبات و شواهد برای آنها تعریف شده‌اند از فواصل فرضی m ۷/۵، ۱۵ و۳۰ پرتاب و به دو زره اصابت می‌کنند. از لحظه‌ی برخورد سرپیکان‌ها به زره‌ها تا توقف حرکتشان به عنوان بازهٔ زمانی شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. از این رو تنها ورودی در ارتباط با کمان، انرژی جنبشی و سرعت اولیه است و انتخاب کمان زاویه‌دار[۲] و کمان B شکل[۳] هم سو با اعتبارشان در میان شواهد باستان‌شناسی دوره مورد بحث (Zutterman, 2003) و پیشینه‌ی مطالعاتی قابل توجه آنهاست؛ براساس پژوهش‌ها، انرژی جنبشی اولیه‌ای که کمان زاویه دار با طول تقریبی cm ۱۵۰ ایجاد می‌کند مقداری در حدود J ۴۰/۹ می‌باشد (Bergman, 1988)[۴]، این مقدار برای کمان B شکل[۵] مقداری بین J ۱۸ تا ۳۶ است (Blyth, 1977) (شکل ۱).



شکل ۱. کمان‌های انتخاب شده برای شبیه سازی: ۱. کمان زاویه دار بازسازی شده توسط برگمان (Bergman et al, 1988) ۲. نقش کماندار با کمان زاویه دار حکاکی شده بر جام طلای حسنلو (Winter, 1989) ۳. کمان های B شکل بدست آمده از گورستان یانقایی در چین (Selby, 2005) ۴. کماندار سکایی در حال به زه کردن کمان B شکل حکاکی شده بر ظرف طلایی کول اوبا (Roll, 1989)

Figure 1. Selected bows for simulation: 1- angular bow reconstructed by Bergman et al, 2- Archer depicted holding an angular bow on a Hasanlu gold bowl, 3- B-shaped bows found in Yanghaii cemetery in China, 4- Scythian archer loading his B-shaped bow with an arrow depicted on the gold Kul oba bowl.

انتخاب سرپیکان‌ها به نوعی بوده تا در حد امکان هم از لحاظ پیوستگی گاهنگاری و گونه‌شناسی به‌عنوان نماینده‌ی نمونه‌های مشابه خود تلقی شود و هم کمیت آنها در بافت‌های مختلفی چون، اسلحه‌خانه‌ها، انبارها، محاصره‌ی قلعه‌ها، میدان نبرد و تدفین به گونه‌ای شود تا بتوان نتایج آزمون را تعمیم بخشید. ویژگی‌های هندسی نوک پرتابه همچون فرم و مساحت مقطع و همچنین زاویه‌ای که تیغه یا لبه‌ها با یکدیگر می‌سازند معیار اصلی انتخاب نمونه‌ها در نظر گرفته شده است؛ بر این اساس ۴ گونه‌ی هرمی (Tanged Pyramidal) یا بادکین زبانه‌دار (Bodkin Arrowhead) (B)، دو لبه‌ی زبانه‌دار با تیغه‌ی برگی شکل Tanged Bilobate Arrowhead (with leaf shape blade) (L)، دو لبه‌ی زبانه‌دار با تیغه‌ی لوزی شکل (Tanged Bilobate Arrowhead with rhombus blade) (R) و سه پره‌ی سوکتی Trilobate Arrowhead (Socketed) (T) جهت آزمون در نظر گرفته شدند. سرپیکان B و L از کاوش سال ۱۳۹۵ مربوط به تدفین عصر آهن II (اَواخر هزاره دوم و اوایل هزارهٔ اول پ.م)(ده پهلوان، ۱۳۹۵) و سرپیکان T نیز از کاوش سال ۱۳۹۶ از تدفینی مربوط به اَواخر عصر آهن III (قرن ۷ و اوایل قرن ۶ پ.م)(ده پهلوان، ۱۳۹۸) توسط هیئت

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

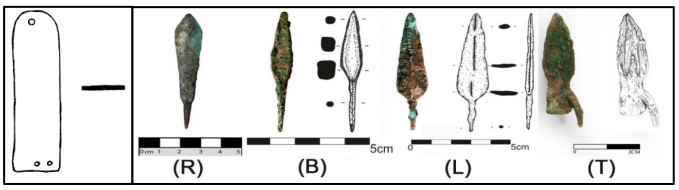
باستان‌شناسی دانشگاه تهران در دشت قزوین با سرپرستی مصطفی ده پهلوان از قره تپهٔ سگزآباد بدست آمده‌اند. سرپیکان R از میان یافته‌های مربوط به کاوش سال ۱۹۵۷ اِریخ اشمیت در خزانه تخت جمشید (Schmidt, 1957) انتخاب شده که هم اکنون در موزه‌ی تخت جمشید نگه داری می‌شود[۶].

برای سنجش تأثیرگذاری سرپیکان‌ها به سراغ دو زره پولکی (Scale Armor (S.A) و کتانی (Linen Armor (L.A) رفتیم که در دوره مورد بحث تقریباً به عنوان پوشش‌های حفاظتی رایج در گستره خاور نزدیک باستان شناخته شده و به کار گرفته می‌شدند. گونه شناسی و گاه نگاری مختصری از جنگ افزارهای منتخب آزمون در ادامه ارائه شده است. تصاویر، ابعاد و جرم دقیق نمونه‌های مورد آزمایش را می‌توانید در شکل (۲) و جدول (۱) مشاهده کنید.

جدول ۱. ابعاد و وزن نمونه های مورد آزمایش.

Table 1. Dimensions and weight of the tested samples.

داده	جرم(g)	طول(mm)	عرض	ضخامت
پولک برنزی	–	121.4	33	**1.3**
(B)7040	7	53	–	**18**
(L)7059	10	75	15	**5**
(T)1226	4.5	3.3	9.5	–
(R)2379	8.8	62	**13 x 5.5**	



شکل ۲. نمونه‌های مورد آزمایش: B. زبانه دار با تیغه‌ی هرمی شکل (بادکین) (Dehpahlavan, 1395) L. زبانه‌دار دولبه با تیغه‌ی برگی شکل (ibid) T. سه پره ی سوکتی با خار روی سوکت (Dehpahlavan, 1398) R. زبانه‌دار دو لبه با تیغه‌ی لوزی شکل S.A.نمونه پولک برنزی از زره پولکی (Stronach, 1958)

Figure 2. Tested arrowheads: (B). Tipped with pyramidal blade (Badkin), (L). Double-edged, tipped with the leaf-shaped blade, (T). Trilobate socket with thorns on the socket (R). Tipped with two edges with rhombic blade form (Source: Authors) and a bronze scale plate of the scale armor (S.A).

۲-۲-۱. بادکین (B)

سرپیکانی با نوک تیز ولی فاقد لبه‌های برنده که براساس شواهد باستان‌شناسی در مقاطع مربعی، مثلثی و دایره‌ای شکل دیده می‌شود؛ شاید بتوان قدمت بادکین با مقطع چهارگوش را طبق آثار بدست آمده از بغازکوی (Boğazköy) (Boehmer, 1972) و نوروزتپه (Norşuntepe) در حدود اواخر هزارهٔ سوم و هزارهٔ دوم پ.م در نظر گرفت (Schmidt, 2002) که به نظر می‌رسد از نیمه دوم هزاره دوم و آغاز هزار اول پ.م رواجشان بیشتر می‌شود (Moorey, 1971). نمونه‌های مدور و چهارگوش غالباً در کنار یکدیگر از اَواخر هزاره‌ی دوم تا قرن ۶ پ.م در مناطق بسیاری چون لوانت[۷]، بین النهرین[۸]، ایران[۹] و آسیای صغیر[۱۰] بدست آمده اند. طول نمونه‌ها اغلب در بازه‌ی ۱ cm تا ۱۰ قرار دارند.

۲-۲-۲. دو لبه‌ی زبانه‌دار با تیغه ی برگی شکل (L)

سرپیکان‌های برگی شکل و زبانه‌دار بدون شک فرم استاندارد این گونه جنگ‌افزارها از دورهٔ برنز تا هزارهٔ اول پ.م به حساب می‌آیند (Szudy, 2015). در فلات ایران، نمونه‌های اولیه و قدیمی سرپیکان فلزی از تپه حصار و طبقه ی C3 (اوایل هزاره‌ی دوم پ.م) کشف شده (Medvedskaya, 1982)که از فرم گونهٔ مورد بحث است. شاید اصلی‌ترین دلیلی که این گونه را در این دورهٔ زمانی تقریباً جهانی می‌سازد (البته تا قرن ۸ و ۷ پ.م، زمانی که گونه‌ی برنزی سوکتی در خاور نزدیک باستان ظهور می‌کند) سهولت ساخت آن است (Szudy, 2015). به علت رواج طولانی‌مدت این گونه در پهنهٔ جغرافیایی وسیع به ندرت ویژگی‌های ظاهری آنها عناصر متنوعی را نشان می‌دهند و تفاوتها را بیشتر می‌توان در شکل شانه و برآمدگی میان تیغه آنها مشاهده نمود (ibid). بافت پیدایش اکثر این آثار تدفینی است[۱۱] و طولشان اغلب به طور میانگین بین ۵ cm تا ۱۲ است.

۲-۲-۳. دو لبه‌ی زبانه‌دار با تیغه ی لوزی شکل(R)

این گونه سرپیکان زبانه‌دار و دارای برآمدگی میان تیغه تا نوک آن و مقطع دو پره و فرم تیغه به شکل لوزی با شانه‌های زاویه‌دار بلند است. ویژگی شاخص این گونه که باعث انتخاب آن نیز شده، فرم خاص نوک آن است که بر خلاف دیگر آثار، دارای نوکی پهن است که زاویه دو لبه تیغه آن نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد (حدود ۷۰ درجه). شواهد باستان‌شناسی این گونه در بازه‌ی اَواخر هزارهٔ دوم پ.م و اوایل هزارهٔ اول اغلب از محوطه‌های هَما (Hama) ، ال خادر (El Khader) و تَل اَجول (Tell Adjjul) در لوانت بدست آمده‌اند (Medvedskaya, 1982). نمونه‌های مشابه آن را می‌توان در میان گورآوردهای گورستان ب سیلک (Ghrishman, 1375) و محوطه‌های پشتکوه لرستان، دروند ب، چال اسد، گل خنان مرده، سرخ دم و مجموعه‌ی سرپیکان‌های کتیبه‌دار بابلی و البته بدون بافت که به گفته اورلَت تیغه آنها معروف به نوک شمعی است، مشاهده نمود که در گاهنگاری عصرآهن II و III قرار می‌گیرند (Overlaet, 2003). با شروع قرن ۶ پ.م این گونه همچنان به حیات خود ادامه داده و در لایه‌های هخامنشی محوطه‌هایی در ایران[۱۲]، مصر[۱۳]، آسیای صغیر[۱۴]، لوانت[۱۵] و یونان[۱۶] پیدا شده است. متأسفانه به علت کمبود مستندنگاری

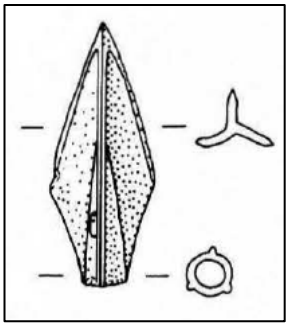
[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

مناسب در گزارشات نمی‌توانیم از ابعاد این گونه مطمئن باشیم ولی براساس نمونه‌های تخت جمشید و سارد احتمالاً طول این سرپیکان‌ها کمتر از mm ۸۰ بوده است.

۲-۲-٤. سه پره سوکتی (T)

گونه‌ی مورد بحث ما در قسمت انتهای تیغه خود بر روی سوکت دارای خاری است که نوک آن به سمت مخالف نوک سرپیکان بوده و در امتداد یکی از پره‌ها یا لبه‌های سرپیکان قرار دارد. این نمونه خارها هیچگاه بر روی سوکت‌های کوتاه یا نمونه‌های سوکت مخفی دیده نمی‌شوند.(شکل۳) این گونه سرپیکان‌های خاردار معمولاً دارای دو نوع تیغهٔ سه پره و دو پره هستند و در بسیاری از بافت‌ها (تدفین، محاصره و اسلحه خانه) در کنار هم دیده می‌شوند. البته نمونه‌های دو پره‌ی سوکتی دارای قدمت بیشتری هستند؛ نمونه‌های تاریخ گذاری شده از کورگان ارژن در سیبری، تاریخ اَواخر قرن ۹ پ.م و نمونه‌های قدیمی‌تر، از اَواخر دوره‌ی آندرونوو (Andronovo) (میانه تا اَواخر هزاره ی ۲ پ.م) در بخش مرکزی استپ‌های اورآسیا دیده می‌شوند (Cleuziou, 1973; Brentjes, 1996).

در محوطه‌های کیمری، اَواخر دوره‌ی زابوتین و فاز نخست دوره‌ی کِلرِمِس ما شاهد حضور گسترده‌ی انواع دو تیغه‌های لوزی شکل سوکتی هستیم (شکل ۴)، اما نمونه‌های سه پره برای نخستین بار از اَواخر دوره‌ی کِلرِمِس (میانه‌ی قرن ۸ پ.م)(Hellmuth, 2014; Alekseev, 2003) تقریباً هم زمان با گزارش منابع آشوری از حضور اقوام سکایی در خاور نزدیک، ابتدا در منطقه‌ی ماوراءقفقاز (Transcaucasia) و بعد از آن از در آسیای صغیر و مناطق جنوبی قفقاز دیده می‌شوند.(Ivantchik, 1997) رواج گونه‌ی سوکتی خاردار طبق شواهد تا پایان قرن ۷ پ.م وآغاز شاهنشاهی هخامنشی در غرب آسیا مشاهده شده[۱۷] و پس از آن جای خود را به نمونه‌های سه پره سوکتی می‌دهد که اغلب به شکل سوکت مخفی هستند (Hellmuth, 2014; Cleuziou, 1973). محبوبیت این گونهٔ سوکت مخفی در دوران هلنی نیز ادامه داشته (Cleuziou, 1973; Stronach, 1978) و توسط اقوام و ملت‌های بسیاری به کار گرفته می‌شود. ابعاد اکثر این سرپیکان‌ها در بازه ی mm ۲۰ تا ۳۵ قرار می‌گیرند.



شکل ۳. نمونهٔ سرپیکان با سوکت مخفی (Baitinger, 2001)

Figure 3. Arrowhead with inner socket

شکل ٤. نمونهٔ سرپیکان زابوتین (Hellmuth, 2014)

Figure 4. Zabotin Arrowhead

۲-۲-۵. دسته‌ی تیر

جرم دسته‌ی چوبی نیز به عنوان بخش مهمی از ساختمان تیر در آزمون مدنظر بوده است. در خصوص این آثار به علت جنس زوال‌پذیر آنها شواهد باستان‌شناسی چندانی در دسترس نیست. اما با این حال می‌توان به نمونه‌های بدست آمده از مقبره‌های مصری استناد کرد؛ این آثار از دوره‌های مختلف تاریخی بدست آمده‌اند و در موزه‌های آشمولین و پیت ریورز دانشگاه آکسفورد نگه داری می‌شوند. جنس اغلب این آثار از نی بوده و دارای قطر mm ۶/۸ تا ۷/۹ است. جرم این اشیاء عددی بین g ۱۰ تا ۱۲/۵ را نشان می‌دهند(Blyth, 1977).

۲-۲-٦. زره پولکی

رواج زره پولکی را می‌توان تقریبا از شروع نیمهٔ دوم هزارهٔ دوم پ.م با توجه به شواهد باستان‌شناسی بدست آمده از منطقهٔ خاورنزدیک مشاهده نمود[۱۸].

نمونه‌ی زره پولکی در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی براساس بررسی نمونه‌های بدست آمده از کاوش باستان‌شناسی محوطه‌های نیمه نخست هزاره اول پ.م که بیشترین کمیت را در داده‌های مادی از این نوع دارند انتخاب شده است[۱۹]. این آثار با ابعاد گوناگونی از کاوشهای باستان‌شناسی بدست آمده‌اند که احتمالاً برای پوشش بخش‌های متفاوتی از بدن مورد استفاده قرار می‌گرفتند. آثار کشف شده در ناحیه خاور نزدیک از میانه‌ی هزارهٔ دوم تا حدود پایان قرن ۷ پ.م، اغلب پولک‌هایی با طولی بین mm ۲۴ تا ۹۰ و عرض بین mm ۲۲ تا ۳۰ هستند و شکل آنها یا چهارگوش است یا در یک سو مدور و در سوی دیگر زاویه‌دار با ضخامتی در حدود mm ۰/۶ تا ۱/۳ (Stronach 1958; Hulit, 2002; Muscarella 1988). این پولک‌ها به‌وسیلهٔ سوراخ‌هایی که بر روی آنها وجود داشت، روی پوششی از جنس چرم یا پارچه دوخته می‌شدند (Stronach 1958; E. V. Cernenko, 1983; Dezső, 2002; Hulit, 2002). بر این اساس برای ضخامت پولک مقدارِ میانگین، یعنی mm ۱/۲ [۲۰] و لایه‌های دوخته

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

شده زیر پولک نیز mm ۱۰ در نظر گرفته شد. در مجموع ضخامت زره پولکی شبیه‌سازی شده mm ۱۱/۲ می‌باشد.

۲-۲-۷. زره کتانی

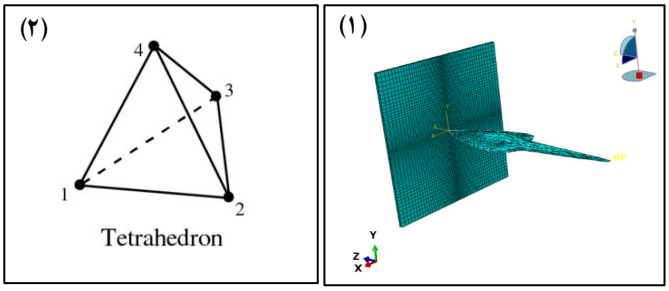
گونه‌ی دوم زره که تقریباً از نیمه‌ی دوم هزاره‌ی اول پ.م رواج پیدا می‌کند، زره پارچه‌ای یا کتانی نام دارد. این نوع در یافته‌های باستان‌شناسی خاور نزدیک چندان بازتابی نداشته و تنها رد پای آن را در اسناد نوشتاری و نقش‌های روی سفال یونانی و رومی می‌توان یافت؛ واژه‌ای که نویسندگان یونانی برای ارجاع به انواع زره‌ها مورد استفاده قرار می‌دادند ترکیبی از ثُرَکس (Thorax) به معنای سینه بود؛ ولی در اصطلاح به زره‌های بالا تنه (Corselet) اطلاق می‌شد (Aldrete et al, 2013). واژه‌ی لینوثُراکس (Linothorax) یا زره بالا تنه‌ی کتانی در آثار نویسندگان یونانی و رومی از قرن ۹ و ۸ پ.م تا اواخر هزارهٔ نخست پ.م به چشم می‌خورد. اما در غیاب شواهد مادی از این زره بهترین منابع جهت شناخت آن نقاشی سفالهای آتیک است که طرح زره کتانی مجموعاً حدود ۹۱۳ بار در میان آنها به نقش درآمده است. بازهٔ گاهنگاری این آثار از حدود ۶۰۰ پ.م آغاز و تا قرن نخست میلادی ادامه پیدا می‌کند[۲۱]. نمونه‌ی زره کتانی در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی براساس الگو و روش انجام شده توسط آلدرته (Aldrete et al, 2013) از ۲۰ لایه کتان به ضخامت mm ۱۲ تشکیل شده است.

۲-۳. مدل‌سازی

طراحی اولیه سرپیکان‌ها ابتدا در محیط (Sketch) در نرم‌افزار (CATIA)صورت گرفت. بعد از اتمام این مرحله، تمامی اشکال طراحی شده وارد نرم‌افزار (ABAQUS) شدند. با توجه به هندسه و توپُر بودن نمونه‌ها، روش مش‌بندی آزاد و گونه چهاروجهی هرمی شکل (C3D4) از اجزاءهای خانواده‌ی (Tet) برای رسیدن به نتایج مفیدتر استفاده شد.(شکل ۵ و ۶)(جدول ۲)

جنس برنز مطابق شواهد به سرپیکان‌ها نسبت داده شد. به دلیل اینکه سرپیکان نسبت به ابعاد پولک کوچکتر بوده است و شکل کلی پولک فقط زمان محاسبات را افزایش می‌داد و تأثیری در نتیجه نداشت، فقط بخش مورد اصابت طراحی و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

خواص صدمه، الاستیکی و پلاستیکی مواد موجود در شبیه‌سازی که شامل برنز، چرم و کتان بودند وارد نرم‌افزار و به مدل مش های ساخته شده نسبت داده شدند. دسته‌ی تمام سرپیکان‌ها از جنس چوب بوده که با جرم ۱۰ گرم با ایجاد یک (Reference-Point)، به سرپیکان نسبت داده شده است. برای هر تیر چهار نوع مدل‌سازی انجام گرفته که دوتای آنها حاصل پرتاب تیر از کمان زاویه دار به زره پولکی (A.B-S.A) و کتانی (A.B-L.A) و باقی حاصل پرتاب تیر از کمان B شکل به اهداف می‌باشد (B.B-S.A; B.B-L.A).



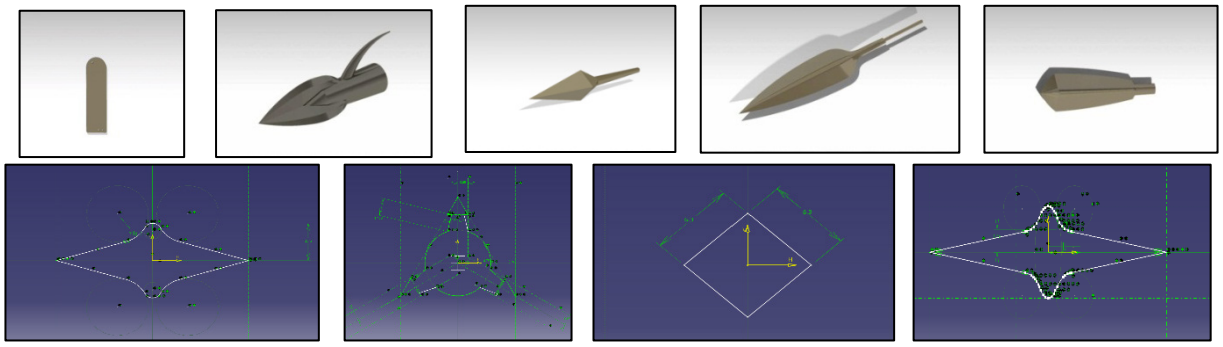
شکل ۵. ۱. نمونه‌ی مش بندی شده ی فرآیند برخورد در نرم افزار Abaqus ۲. یک جزء یا مش گونه‌ی چهاروجهی هرمی شکل (C3D4).

Figure 5. Right. The element of the pyramidal quadrilateral type (C3D4), Left. The sample of the mesh-free model of the impact process in Abaqus software.

جدول ۲. تعداد اجزاء استفاده شده در شبیه سازی نمونه ها.

Table 2. The number of elements used in the simulation of the samples.

جسم	(T) 1226	(L) 7059	(R) 2379	(B) 7040	زره
تعداد اجزاء	5282	1121	9808	5456	3025



شکل ٦ . نما و مقاطع سرپیکان‌های شبیه سازی شده در نرم افزار Abaqus. ۱. R ۲. T ۳. B ۴. L ۵ . پولک برنزی زره

Figure 6. View and sections of arrowheads simulated in Abaqus software. 1. R 2. T 3. B 4. L 5. Bronze scale armor

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

۲-٤. مقاومت هوا و انرژی جنبشی برخورد

این بخش دربردارنده‌ی حرکت تیر از زمان خروج از کمان تا لحظه ی برخورد با زره می‌شود. در این وضعیت مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر حرکت تیر، مقاومت یا در اصطلاح اصطکاک هوا است. این نیرو که باعث کاهش انرژی جنبشی و به تبع آن سرعت تیر می‌گردد با (R) نشان داده شده و مقدار کلی آن از رابطه ($R = \frac{2KU}{m}$) محاسبه می‌شود[۲۲] (K) به عنوان فاکتور پسا (Drag factor) جسم در برخورد با هوا شناخته می‌شود و به هندسه‌ی سرپیکان بستگی دارد. (U) میانگین انرژی جنبشی در مسافت طی شده است و (m) جرم تیر می‌باشد (Blyth, 1977). به علت در اختیار نداشتن انرژی جنبشی نهایی، براساس رابطه‌ی (R) می‌توان این مقدار یا (U)' تیر را از رابطه‌ی ($U' = U_0 e^{\frac{-2KS}{m}}$) به دست آورد که (U0) انرژی جنبشی اولیه تیر، (K) کشش سطحی، (S) میزان مسافت طی شده و (m) جرم تیر است (Ibid). یکی دیگر از راه‌هایی که می‌توان میزان تأثیر فشار هوا بر مقدار انرژی و سرعت را البته تقریبی مشخص کرد، محاسبه‌ی ضریب بالستیکی اجسام (C0) است و مقدار آن از رابطه‌ی $C_0 = \frac{Am}{K}$ محاسبه می‌شود؛ (A) به عنوان ثابت استاندارد اتمسفر، تقریبا دارای مقدار ثابتی است، (m) جرم جسم و (K) همانگونه که گفته شد فاکتور پسا می‌باشد. همانطور که مشخص است در هر دو رابطه جرم و هندسه‌ی سرپیکان به واسطه‌ی میزان (K) عواملی موثر در مقدار مقاومت هوا و انرژی جنبشی نهایی به حساب می‌آیند؛ براساس مطالعات انجام شده با بهره‌گیری از تونل باد[۲۳] و آزمایش پرتاب[۲۴]، فاکتور پسای تیرهای مدرن بین کمینه‌ی 3.8×10^{-5} و بیشینه‌ی 16×10^{-5} قرار می‌گیرند. چون جرم و ابعاد تیرهای انتخاب شده از نمونه‌های امروزی کمتر است، مقدار کمینه برای K مناسب‌تر به نظر می‌رسد. ثابت استاندارد اتمسفر یا همان (A) نیز 1.69×10^{-4} تعریف شده است (Ibid). با احتساب این مقادیر و جرم تیرها ضریب بالستیکی تقریبا بین ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۵ قرار می‌گیرد که بسیار ناچیز بوده و طبق جدول ارائه شده از سوی رینگان و هیچمن (۱۹۴۸) (Rheingans, Hickman) در مسافت‌های انتخابی (۷/۵ m، ۱۵ و۳۰) تغییری بسیار اندک در میزان سرعت و انرژی جنشی تیر می‌دهد که می‌توان از مقاومت یا اصطکاک هوا چشم پوشی کرد. البته تحلیل براساس ضریب بالستیکی همان‌گونه که بیان شد تقریبی است و برای دستیابی به مقدار دقیق باید از رابطه‌ی U' یا انرژی ثانویه یا نهایی بهره برد که برای هر تیر محاسبه شده و مقادیر آن در جداول (۳ و۴) آمده است. براساس این اطلاعات میانگین انرژی جنبشی و سرعت نهایی تیرها در سه مسافت تعیین شده برای لحظه‌ی برخورد در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. میانگین سرعت و انرژی جنبشی برخورد نمونه‌ها پرتاب شده از کمان زاویه‌دار در پس از طی فواصل تعیین شده.

Table 3. The average velocity and kinetic energy of the collision of the samples thrown from the angular arc after the specified distances.

نوع تیر	جرم (g)	انرژی جنبشی اولیه(J)	سرعت اولیه (M/S)	انرژی/سرعت در نقطه ۷.۵ m	انرژی/سرعت در نقطه ۱۵ m	انرژی/سرعت در نقطه ۳۰ m	میانگین سرعت در مسافت ۳۰ m	میانگین انرژی در مسافت ۳۰ m
B	17	40	68.5	37.4–66.4	35.8–64.9	34.4–63.7	65	**35.8**
T	14.5	40	74.2	38–72.5	36.2–70.7	33.5–74.2	70	**35.9**
R	18.8	40	65.2	38.5–64	36.9–62.7	35.5–65.2	63.7	**36.9**
L	20	40	63.2	38.5–62.1	37.2–61	36–63.2	61	**37.2**
						میانگین	64.5	**36.4**

جدول ٤. میانگین سرعت و انرژی جنبشی برخورد نمونه‌ها پرتاب شده از کمان B شکل در پس از طی فواصل تعیین شده.

Table 4. The average velocity and kinetic energy of the collision of the samples thrown from the B-shaped arc after the specified distances.

	جرم(g)	انرژی جنبشی اولیه(J)	سرعت اولیه (m/s)	انرژی/سرعت در نقطه ۷.۵ m	انرژی/سرعت در نقطه ۱۵ m	انرژی/سرعت در نقطه ۳۰ m	میانگین سرعت در مسافت ۳۰ m	میانگین انرژی در مسافت ۳۰ m
B	17	30	59.4	58.2–28.7	56.9–27.5	55.7–26.3	56	27.5
T	14.5	30	64.3	62.7–28.5	61.2–27.1	59.7–25.8	61	27.1
R	18.8	30	56.4	55.4–28.8	54.2–27.6	53.3–26.7	54.3	27.7
L	20	30	54.7	53.6–28.7	52.7–27.7	52.1–27.1	52.8	28.7
						میانگین	56	27.5

جدول ۵ . نتایج و مقدار زمان شبیه سازی برای هر سرپیکان

Table 5. Results and simulation time for each arrowhead

	مقدار نفوذ/زمان شبیه سازی							
گونه کمان/زره	سرپیکان 2389 (R)		سرپیکان 7040 (B)		سرپیکان 7059 (L)		سرپیکان 1226(T)	
کمان زاویه دار- زره پولکی	14.5 mm	355 دقیقه	22.79 mm	453 دقیقه	13.1 mm	352دقیقه	12.67 mm	462 دقیقه
کمان زاویه دار- زره کتانی	عبور کامل	331 دقیقه	عبور کامل	283 دقیقه	عبور کامل	344 دقیقه	17.4 mm	350 دقیقه
کمان سکایی – زره پولکی	9.52 mm	350 دقیقه	17.74 mm	479 دقیقه	10.83 mm	359 دقیقه	12.66 mm	355 دقیقه
کمان سکایی – زره کتانی	عبور کامل	345 دقیقه	عبور کامل	230 دقیقه	عبور کامل	279 دقیقه	12.1 mm	232 دقیقه

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

۳. بحث

۳-۱. نتایج شبیه سازی

مجموعاً ۱۶ حالت متفاوت در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد که میانگین کل زمان شبیه‌سازی برای نمونه‌ی R ۳۴۵/۲، نمونه B ۳۶۱/۲، نمونه L ۳۳۳/۵ و نمونه T ۳۴۹/۷ دقیقه به طول انجامید. نتایج اصلی شبیه‌سازی به صورت تغییر مکان نوک سرپیکان بروی سطح دو زره در جدول (۵) قابل مشاهده است. نمودار تنش فون مایزس و میزان تخریب هر سرپیکان به همراه فیلم‌های تهیه شده از ۱۶ حالت شبیه‌سازی برای اطلاعات بیشتر به صورت فایل مجزاء به مقاله پیوست شده است.

۳-۲. اثربخشی و عملکرد سرپیکان‌ها

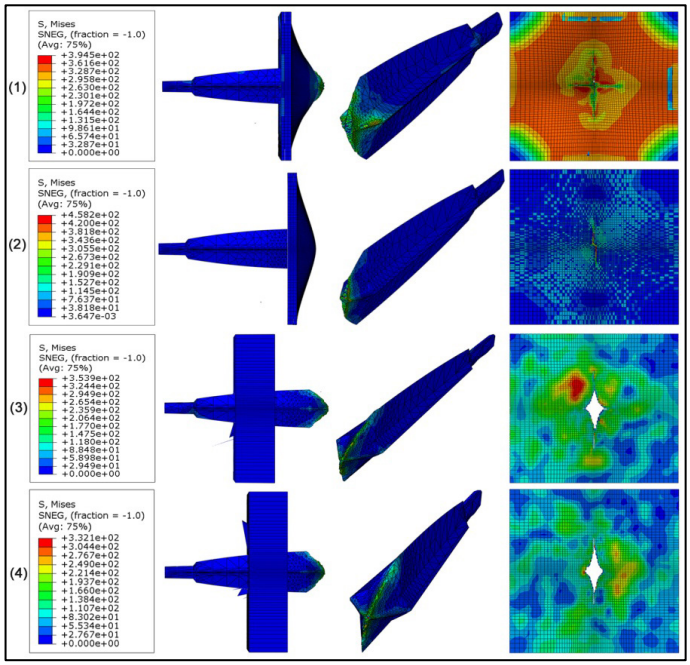
ارزیابی اثربخشی و بازده سرپیکان در روند برخورد، فرآیند پیچیده ای است که معمولاً شامل پدیده‌هایی چون تغییر شکل الاستیک (Elastic) و پلاستیکی (Plastic)، مسدودشدگی (Plugging) (Borvik et al, 2001)، گلبرگی‌شدن (Petalling) Wierzbicki 1999; Landkof & Goldsmith, 1985) و سوراخ‌سازی (Perforation) زره می‌شود (Dean et al, 2009).

اولین مرحله، تغییر شکل صفحه زره است که در حالتهای اِلاستیک و پلاستیکی[۲۵] ظاهر می‌شود. این تغییر شکل رابطه مستقیمی با میزان تَنش و کُرنش مواد تشکیل‌دهندهٔ زره دارد و بوسیلهٔ معیار تسلیم تَنش فون مایزس و فرمول شکل پذیری جانسون و کوک تعریف می‌شود (Johnson & Cook, 1985). براساس نمودارهای تنش فون مایزس (تصاویر ۱۰- ۷) و نتایج حاصله، هر دو زره مورد آزمون از مرحلهٔ تغییر شکل اِلاستیک گذر کرده و به مرحلهٔ پلاستیک رسیدند. این وضعیت برای تمامی سرپیکان‌ها به استثناء مدل B در شرایط A.B-L.A و B.B-L.A و مدل L در شرایط A.B-L.A نیز رخ داده است. بیشترین سطح تغییر شکل پلاستیک در حالت A.B-S.A دیده شد که مقدار آن برای زره ۱۴/۵ mm و تحمل تنشی بیش از mpa ۳/۹۴۵e+۰۲+ (شکل ۷) حاصل ضربهٔ مدل R، و برای سرپیکان، خمشِ بیش از ۱۳ mm نوک مدل L با تحمل تنشی در حدود mpa ۲/۰۲۰e+۰۵ + است (شکل ۹).

مرحله دوم شکست است که در حالات مسدود شدگی، گلبرگی شدن و سوراخ‌سازی پدیدار می‌شود. معیار آن توسط معادله فون میزس و شاخص آسیب جانسون-کوک به صورت $D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}_{pl}}{\varepsilon_{f.pl}}$ تعریف شده است. در این رابطه $\Delta \bar{\varepsilon}_{pl}$ نشان دهنده‌ی رشد کُرنش پلاستیکی ذخیره شده و $\varepsilon_{f.pl}$ مقدارکُرنش پلاستیک منجر به شکست است. شکست زمانی رخ می‌دهد که D≥1 باشد (Johnson & Cook, 1985; Dean et al 2009)، هنگامی که این شرط در یک عنصر (اجزاء جسم شبیه‌سازی شده) برآورده شد از مِش حذف می‌شود. براساس تصاویر ارائه شده از فرآیند برخورد، مدل T بیشترین آسیب/ شکست در ضربه را با مواجهه بیش از mpa ۴/۱۵۹e+۰۲+ تنش و از دست دادن نوک خود نشان داده (شکل ۱۰)، همچنین تنها مدل R در وضعیت B.B-S.A حالت شکست را برای هدف خود ایجاد نکرده است (شکل ۷(۲)). با این حال، نوک پیکان‌های R، L و T در انجام فرآیند سوراخ‌سازی یا ایجاد تهدید برای زره پولکی موفق نبودند. از طرف دیگر زره کتانی به حد خود رسیده (mpa ۳/۳۲۱e+۰۲ + - ۵/۰۱۲e+۰۴+) و در برابر تمامی سرپیکان‌ها شکست و سوراخ شدگی را تجربه کرده است.

چرا مدل B موفق به انجام فرآیند سوراخ‌سازی روی زره پولکی شد، اما مدل‌های دیگر خیر؟ چگونه زره کتانی نتوانست در برابر نفوذ مقاومت کند؟ اینها سوالات اصلی این بخش هستند.

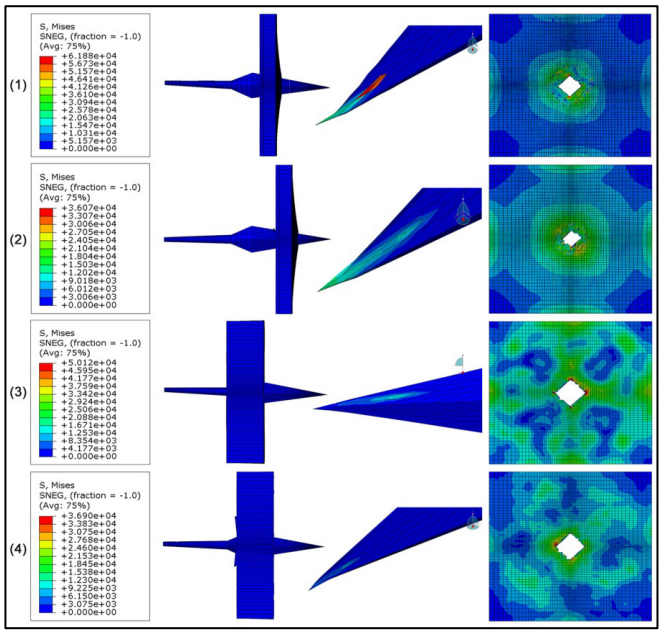
کار سوراخ‌سازی در صفحات نازک همچون زره‌ها فرمول یا رابطه خاصی ندارد و در مطالعات انجام شده در این زمینه تنها سعی شده سرعت و معیار آن پیش‌بینی شود. ولی تقریباً همه این پیش‌بینی‌ها روی سه پارامتر اصلی مأثر بر حد بالستیکی، انرژی جذب شده یا افت سرعت، ویژگی‌های هندسی نوک پرتابه و خواص مکانیکی و ضخامت هدف تأکید دارند، (Gupta et al., 2006; Tan et al., 2003; Borvik et al., 2002; Forrestal et al., 1990; Anderson & Bodner, 1988; Corran et al., 1983; Dean et al., 2009)



شکل ۷. نمودار تنش مدل R در برخورد: ۱. حالت A.B – S.A ۲. حالت B.B – S.A ۳. حالت A.B – L.A ۴. حالت B.B – L.A.

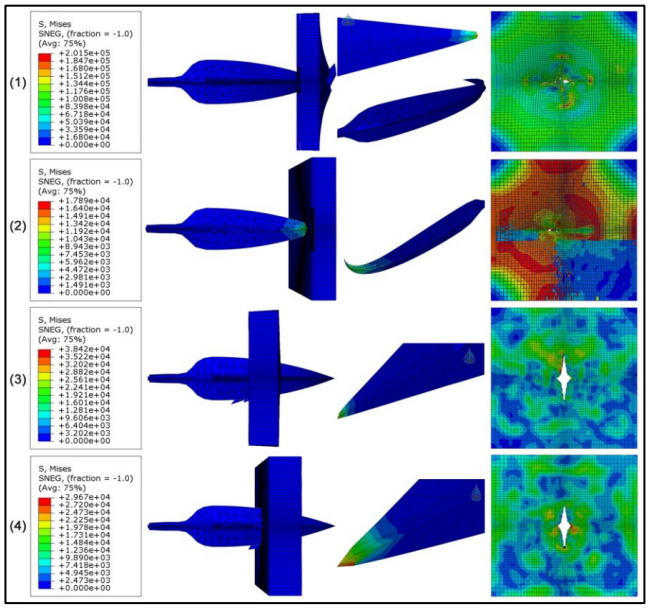
Figure 7. The stress charts of model R at the impact in: (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026



شکل ۸. نمودار تنش مدل B در برخورد: ۱. حالت A.B – S.A ۲. حالت B.B – S.A ۳. حالت A.B – L.A ۴. حالت B.B – L.A.

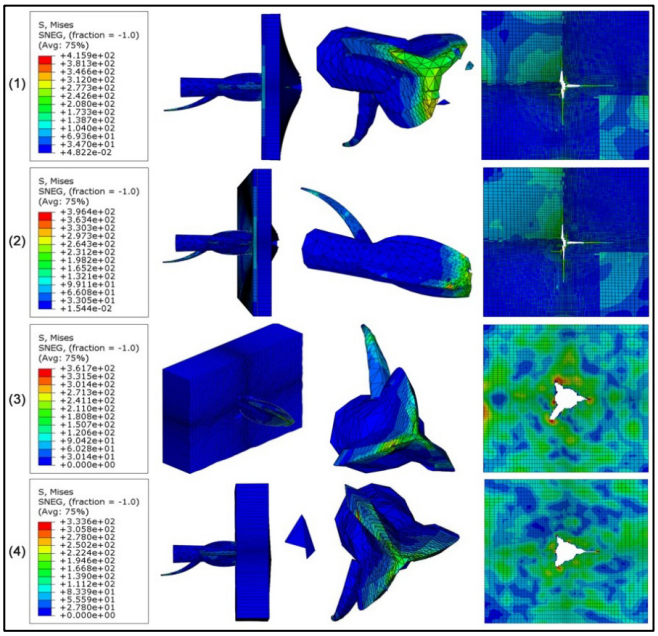
Figure 8. The stress charts of Model B at the impact in: (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state.



شکل ۹. نمودار تنش مدل L در برخورد: ۱. حالت A.B – S.A ۲. حالت B.B – S.A ۳. حالت A.B – L.A ۴. حالت B.B – L.A.

Figure 9. The stress charts of model L at the impact in (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state.

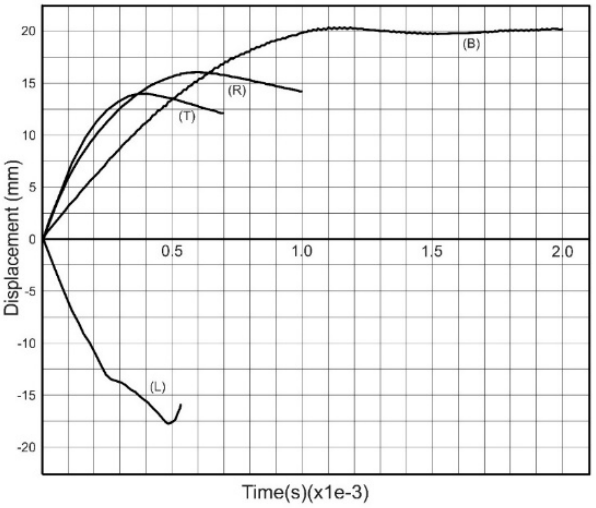
انرژی جذب شده توسط زره از رابطه‌ی $E_{absorbed} = \frac{1}{2}m\,(V_{impact}^2 - V_{drop}^2)$ یا میانگین بین سرعت اولیه برخورد V_{impact} و کمترین سرعت برخورد که باعث سوراخ‌سازی کامل هدف شده V_{drop} محاسبه می‌شود (m جرم پرتابه است). حرکت منحنی نوک سرپیکان‌ها روی صفحه ی زره پولکی که در بازه‌ی انرژی‌های جنبشی نسبت داده شده به وضوح نشان‌گر گذر از تغییر شکل الاستیک به پلاستیک در فرآیند برخورد تمامی نمونه است (اشکال ۱۱ و ۱۲). مدل‌های T، L و R در زمان کوتاه‌تری نسبت به نمونه‌ی B به بیشینه جابجایی می‌رسند و بعد از آن روند خلاف جهت یا نزولی را به ثبت رساندند. از سوی دیگر مدل L از همان ابتدای فرآیند مقدار منفی یا خلاف جهت را نشان می‌دهد که با مقایسه‌ی منحنی با تصاویر برخورد پرتابه، می‌توان تغییر شکل پلاستیک نوک آن را مشاهده کرد، البته نیروی وارده در این مورد باعث تغییر شکل زره نیز شده است (شکل ۹ (۲-۱)). حرکت منحنی‌های جابجایی نوک پرتلبه‌ها در برخورد با زره کتانی نیز روندی مشابه را نشان می‌دهد، با این تفاوت که تمامی مدل‌ها جابجایی مثبت را ثبت کردن (اشکال ۱۳ و ۱۴). در وضعیت‌های A.B-S.A و B.B-S.A در حالی‌که مدل‌های R، T و L هیچ سوراخ‌سازی را ثبت نکرده‌اند، انرژی جذب شدهٔ زره تقریباً برابر با انرژی اولیه برخورد در نظر گرفته می‌شود. در حالات دیگر که سوراخ‌سازی رخ نداده، برای دستیابی به درک بهتر از رفتار نوک پیکان، محدودهٔ جابجایی آن در هنگام برخورد به عنوان معیار محاسبهٔ انرژی جذب شده در نظر گرفته شده است. مقادیر انرژی جذب شدهٔ چهار مدل در حالات A.B-L.A و B.B-L.A در بازه‌ی صفر تا ۰/۶e−۰۳ ثانیه محاسبه شده‌اند. منحنی جابجایی- زمان مدل‌ها در اشکال (۱۱ تا ۱۴) و مقادیر آن در جدول ۶ قابل مشاهده هستند. براساس جدول، زره پولکی میانگین ۹۰/۸٪ انرژی جذب شده را در بیشنه و ۷۸/۵٪ را در کمینه سرعت اولیه به ثبت رسانده، در حالی که زره کتانی مقادیر ۳۲٪/۰۵ و ۳۵٪ را در شرایط مشابه ثبت کرده است.



شکل ۱۰. نمودار تنش مدل T در برخورد: ۱. حالت A.B – S.A ۲. حالت B.B – S.A ۳. حالت A.B – L.A ۴. حالت B.B – L.A.

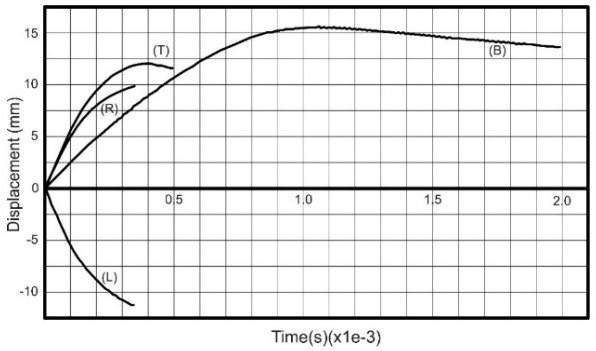
Figure 10. The stress charts of model T at the impact in (1) A.B-S.A state, (2) B.B-S.A state, (3)A.B-L.A state, (4) B.B-L.A state

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026



شکل ۱۱ . جابجایی – زمان مدل‌ها در حالت A.B – S.A

Figure 11. The displacement-time curves of models on: A.B-S.A state.

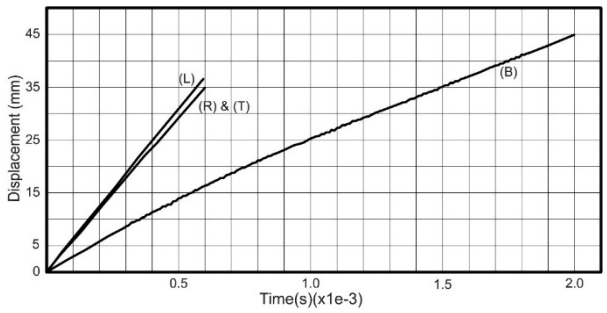


شکل ۱۲. جابجایی – زمان مدل‌ها در حالت B.B – S.A

Figure 12. The displacement-time curves of models on: B.B-S.A state.

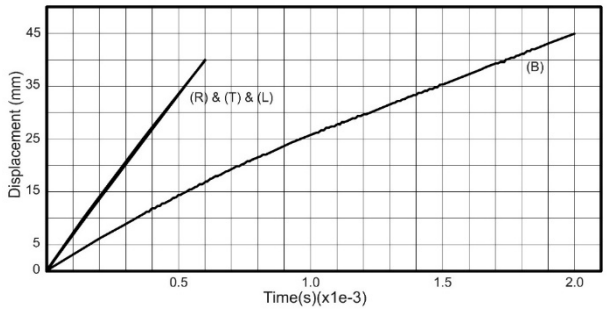
در مقابل زره پولکی، مدل L با بالاترین انرژی جنبشی کمترین سطح انرژی جذب شده را ثبت کرد و از میان سه مدل دیگر با وجود داشتن تقریباً همان سطح جذب انرژی، تنها مدل B فرآیند سوراخ‌سازی را انجام داده است. در برابر زره کتانی مدل L عملکرد مشابهی دارد. اما نکته قابل توجه این است که با وجود ثبت سوراخ‌سازی توسط تمامی سرپیکان‌ها سطح انرژی جذب شده‌ی مدل B بسیار بیشتر از بقیه است. طبق آمار با افزایش سرعت اولیه شاهد افزایش سرعت حد بالستیکی و کاهش میزان تغییر شکل در زره پولکی هستیم. این در حالی است که در سرعت‌های بالا (همچون سرعت گلوله بین ۱۲۰–۳۷۰m/s) پیامدها کاملاً برعکس اتفاق می‌افتند (Dean Forrestal et al, 1993 Tan et al, 2003; ; Gupta et al, 2006 et al, 2009;).

دلیل رخ دادن یا ندادن سوراخ‌سازی با بررسی ویژگی‌های هندسی پرتابه‌ها بیشتر روشن خواهد شد (جدول ۷ و شکل ۱۱). در اکثر معادلات، تغییر انرژی جذب شده توسط زره رابطه مستقیمی با سطح مقطع لحظه‌ای (Anderson & Bodner 1988 ;Awerbuch & Bodner, 1974) یا تغییر قطر پرتابه در محدودهٔ برخورد (Gupta et al, ;Ravid & Bodner, 1983; Corran et al 1983 2006 ;Borvik et al, 2002) و زاویه تیغه‌ها در نوک سرپیکان (Thomson, 1955; Zaid and Paul. 1957) دارد.



شکل ۱۳ . جابجایی – زمان مدل‌ها در حالت A.B – L.A

Figure 13. The displacement-time curves of models on: A.B-L.A state.



شکل ۱۴. جابجایی – زمان مدل‌ها در حالت B.B – L.A

Figure 14. The displacement-time curves of models on: B.B-L.A state.

جدول ٦. مقادیر محاسبه شدهٔ سرعت و انرژی جذب شده مدل‌ها

Table 6. The calculated amounts of velocity and energy absorbed of models

	$v_i(M/S)$	v_r	v_{bl}	E_a(J)
$R_{A.B-S.A}$	63.7	25.8 - 14.1	37.9 – 49.6	30.7 – 35.1
$B_{A.B-S.A}$	65	20.6 - 11.3	44.4 – 53.7	32.2 – 34.77
$L_{A.B-S.A}$	61	37.2 - 29.2	23.8 – 31.8	23.4 – 28.7
$T_{A.B-S.A}$	70	35 - 17.1	35 – 52.9	27.1 – 33.8
$R_{B.B-S.A}$	54.3	28.5	25.8	20.1
$B_{B.B-S.A}$	56	16.09 - 8	39.91 - 48	25.3 - 27
$L_{B.B-S.A}$	52.8	32.8	20	18
$T_{B.B-S.A}$	61	35 - 27	26 - 34	18.3 - 21.9
$R_{A.B-L.A}$	63.7	58.3	5.4	5
$B_{A.B-L.A}$	65	29.1	35.9	28.7
$L_{A.B-L.A}$	61	60	1	1.2
$T_{A.B-L.A}$	70	58.3	11.7	11.3
$R_{B.B-L.A}$	54.3	50	4.3	4.2
$B_{B.B-L.A}$	56	28.3	27.7	20.7
$L_{B.B-L.A}$	52.8	50	2.8	3.5
$T_{B.B-L.A}$	61	48.3	12.7	10.2

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

جدول ۷. ویژگی‌های هندسی مدل‌ها

Table 7. Geometrical properties of models

Model مدل	Maximum cross sectional area (mm^2) بیشینه مقطع مساحت	A.B-S.A & B.B-S.A States		A.B-L.A & B.B-L.A States	
		In action c.s area (mm^2) مقطع درگیر در برخورد	Tip length involved (mm) طول نوک درگیر در برخورد	In action c.s area (mm) مقطع درگیر در برخورد	Tip length involved (mm) طول نوک درگیر در برخورد
R	≤ 35.9	≤ 13.5	4	≤ 35.9-8.7	35
B	39.6	1.12-30.5	22.5	16.8	17.5
L	≤ 40.2	≤ 2.7	13	≤ 4.9	35
T	≤ 38.3	≤ 19.1	9	≤ 28.2	30

همانطور که بالا بودن ابعاد می‌تولند باعث کاهش تأثیرگذاری شـــود، پایین بودن بیش از اندازهٔ آن نیز می‌تواند اثر منفی داشـته باشـد. مدل L به دلیل کوچک بودن ســـطح مقطع برخورد، کمترین انرژی جذب شـــده را در چهار حالت ثبت کرد. شکل‌های (۹ و۱۱) کوچک بودن ناحیهٔ درگیر این مدل و تغییر شکل نوک آن در برخورد با زره پولکی را نشان می‌دهد. مدل‌های R و T تقریباً به همان میزان انرژی جذب شده در برخورد با زره پولکی را دارند، اما عواملی مانند درگیری بیشـینه سـطحِ مقطع در ناحیه برخورد و بالا بودن زاویه تیغه‌ها در نوک، تأثیرگذاری سرپیکان را در سوراخ‌سازی تضعیف کرده است. حاصل درگیر شدن حدود mm ۴ از نوک مدل R در مقابل حدود mm ۹ از مدل T، تنها تغییر شکل پلاستیک زره است، در حالی که با همان سطح انرژی جذب شده توسط مدل T، نه تنها تغییر شکل پلاستیکی رخ داده بلکه باعث آسیب بیشتر و شکست زره شده است. تفاوت واضح در سطح مقطع درگیر در s ۰۳− e۰/۶ فرآیند سـوراخ‌سـازی می‌تواند تفاوت جذب انرژی این دو مدل توسـط زره کتانی را توضـیح دهد. مدل B مطابق جدول ۷ در مقابل زره کتانی به دلیل درگیر شـدن طول بیشـتری از تیغه آن و افزایش سـطح مقطع درگیر در طول فرآیند، بیشترین میزان جذب انرژی را به خود اختصاص داده، این روند افزایشـی در خصـوص زره پولکی مانع از عبور کامل زره شـده است.

بـدین ترتیـب طبق شـــواهـد و نتـایج، بین اهـداف، زره کتـانی بـا وجود ضـخامت بیشـتر، هدف آسـان‌تری نسـبت به رقیب خود با بیش از mm ۳۵ مسـاحت سـوراخ برای هر سـرپیکان اسـت. مدل B در بین سـرپیکان‌ها با ویژگی‌های هندسـی مناسـب، بهترین عملکرد را با ثبت سـوراخ‌سـازی در هر چهار حالت از خود نشـان داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با شـرایط در نظر گرفته شـده در شـبیه‌سـازی، تأثیرگذارترین عوامل در اثربخشـی و بازده پرتابه‌ها در فرآیند برخورد، ویژگی‌های هندســـی آنها و خواص مکانیکی زره می‌باشد.

۳-۳. عمق نفوذ و صدمه ی مرگبار

در شـرایطی ضـربه ی وارده از تیر باعث صـدمه ی جدی و یا مرگ می شود که تیر از چهار لایه، زره، تغییر شکل زره، لباس یا پوشش زیر زره و در نهایت پوست گذر کند. در خصوص پوشش زیر زره براساس مدارک تصویری چون سنگ تراشی های کاخ های آشوری[۲۶] و نقاشی های رو سفال آتیک[۲۷] می‌توان تشخیص داد که سربازان پوششی را زیر زره به تن می کردند، اگر از این شواهد نیز صرف‌نظر کنیم باز هم سرباز نیازمند پوششی بوده تا از عرق کردن و چسـبندگی زره به پوسـت جلوگیری نماید. احتمالا ضـخامت این پوشـش نازک بوده اسـت. برای این لایه mm ۱ تا ۳ را در نظر گرفته شـده. آخرین لایه ای که تیر باید به آن نفوذ کند تا منجر به صـدمه گردد پوسـت بدن انسـان اسـت. براسـاس پژوهش بلیتمن و دیئِت (Bleetman & Dyet) ضـخامت پوسـت و همچنین فاصـله آن با ارگان‌های مهم بدن چون طحال، کبد، کلیه و شـــش‌ها مقدار ثابتی نیســـت، در این پژوهش مقدار کمینه‌ی میانگین mm ۱۶ و بیشـــینه آن را mm ۳۱ ارائه می‌دهد که به ترتیب برای طحال و کلیه راست در نظر گرفته شده است (Bleetman & Dyer, 2000). حال اگر مقدار کمینه را در نظر بگیریم با احتسـاب ضـخامت mm ۱۱/۲ زره پولکی و mm ۱۲ زره کتانی، در مجموع دست کم تیر در بهترین حالت mm ۲۸/۲ [۲۸] از سـطح زره پولکی و mm ۲۹ [۲۹] از سـطح زره کتانی عبور کرده تا منجر به آســـیب جدی گردد. تنها نمونه‌ای که در برخورد با زره پولکی به میانگین نزدیک می‌شـــود نمونه B با mm ۲۲/۷۹ نفوذ اســـت. البته نباید فراموش کرد که ورود سـرپیکان به mm ۱۶ پوسـت بدن خونریزی و درد را در پی خواهد داشـــت.(Bleetman & Dyer, 2000) از این رو تغییر شـــکل پلاسـتیکی زره پولکی به هنگام برخورد سـه نمونهٔ دیگر در حالت بیشـینه با میانگین mm ۱۳/۴ احتمالاً می‌توانسته درد شدیدی را برای سرباز به همراه داشـــته باشـــد. اما زره کتانی را با ثبت میانگین mm ۴۰/۱ نفوذ، نمی‌توان پوششـی مناسـب در جهت جلوگیری از صـدمات جدی و مرگبار به حساب آورد. بدین ترتیب زره پولکی برای جلوگیری از صدمات جدی و مرگبار گزینه مناسبی به نظر می‌رسد.

٤. جمع بندی و نتیجه گیری

شاید بهتر باشد در این بخش نتایج بدست آمده را با کمیت آثار انتخاب شـده در میان شـواهد باسـتان‌شـناسـی مورد ارزیابی قرار دهیم. همانطور که نتایج نشان دادند سرپیکان گونه‌ی B در آزمایش ما بهترین عملکرد را نسبت به سه گونه‌ی دیگر به نمایش گذاشت. حال در شرایطی که می‌توان هندسهٔ ســـرپیکان را عاملی مهم در بهبود بازده به حســـاب آورد، چقدر این عامل

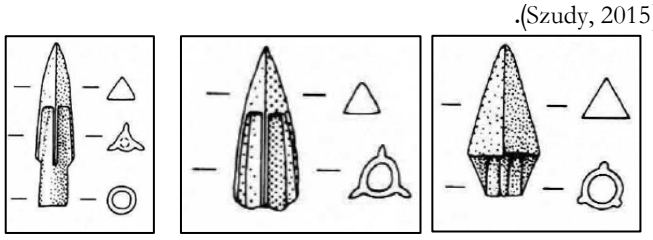
[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

(جبرگرایی تکنولوژیکی) در زمان حیات و رونق این جنگ افزارها تاثیرگذار بوده است؟ پاسخ پیچیده و مشکل است زیرا شواهد باستان‌شناسی لزوماً بازگو کننده تمام واقعیات و حقایق نیستند ولی با این حال تنها راویانی هستند که در اختیار داریم؛ اگر به شواهد موجود استناد کنیم رابطه‌ی بین جبرگرائی و رونق نمونه‌ها تا اَواخر قرن ۷ پ.م ناهمگون به نظر می‌رسد. نمونه‌های R، L و T با اینکه نسبت به نمونه‌ی B بازده ضعیف‌تری دارند ولی در میان شواهد باستان‌شناسی دارای کمیت بیشتری هستند. به طوری که نمونه‌های مشابه برنزی و آهنی گونه L در بسیاری از محوطه‌های خاور نزدیک باستان تا اَواخر قرن ۷ پ.م (szudy, 2015; Medvedskaya, 1982) و نمونه‌های آهنی و سوکتی برنزی[۳۰] آن در دوران هخامنشی (میانه قرن ۶ پ.م تا میانه ی قرن ۴ پ.م) رواج دارند (Cleuziou ,1977; Erdmann 1973). آثار پیدا شده خارج از محدوده‌ی فلات ایران اغلب در بافت غیر تدفینی و در ارتباط با دوران آشور نو دیده می‌شوند.[۳۱] به این نکته باید اشاره داشت که از آغاز هزارهٔ اول شاهد کاهش طول تیغه‌ی نمونه‌های مشابه گونهٔ L هستیم(szudy, 2015)، در حالی که از میانه هزاره دوم تا هزاره نخست طول تیغه‌ها از نمونه مورد آزمایش ما نیز بیشتر(بین ۵ تا ۱۰ سانتیمتر) بوده است. این روند کاهشی در طول را می‌توان هم سو با نتایج بدست آمده در نظر گرفت.

در مورد سرپیکان R و انواع مشابه آن که بیشتر در نواحی غربی بین النهرین و لولنت یافت شده‌اند، تغییر چندانی در کمیت آثار قبل و در طول هزاره اول پ.م مشاهده نمی‌شود[۳۲]، تنها پراکندگی آنها در نیمه نخست هزاره اول به مناطق شرقی بین النهرین امتداد یافته و کمتر در بافت تدفینی دیده می‌شوند[۳۳] (Medvedskaya, 1982). در مقولهٔ تعداد، گونهٔ R و نمونه‌های مشابه آن نسبت به گونهٔ B دست بالا را دارند[۳۴] ، اما علی‌رغم رونق آن تا اَواخر دوران هخامنشیان این نسبت در مقایسه با دو گونهٔ T و L کمتر است. با توجه به بازده این سرپیکان در آزمون و موارد مطرح شده، باز شاهد عدم تطابق بین کیفیت و کمیت R و انواع مشابه آن هستیم.

گونه‌ی T و نمونه‌های مشابه آن که دارای خاری روی سوکت هستند عمری بیشتر از ۱۵۰ سال (تا اوایل قرن ۶ پ.م) نداشتند و این زائده خار مانند دیگر میان سرپیکان‌های معروف به سکایی در دوره‌های بعدی دیده نمی‌شود(Hellmuth, 2014; Cleuziou ,1977). این تغییر در طراحی را می‌توان تا اندازه‌ای با جبرگرایی هم سوی دانست، ولی کماکان سرپیکان‌های سه پره‌ی سوکتی در پهنه‌ی وسیعی از خاور نزدیک به حیات خود تا دوران روم باستان ادامه می‌دهند و از محبوبیتشان کاسته نمی‌شود.[۳۵]

حال که کمیت شواهد در راستای کیفیت و کارکرد مطرح شده قرار ندارد و سرپیکان‌های T, R, L را نمی‌توان گزینه مناسبی برای مقابله با ارتشی زرهی دانست، تنها این فرضیه به نظر می‌رسد که کیفیت پایین نمونه‌های T, R, L در آزمون لزوماً بیانگر این نیست که آنها سلاح‌هایی نا مرغوب بوده‌اند، بلکه تنها بی‌تأثیر بودن آنها در مقابل اهداف زرهی را نشان می‌دهد و همچنین می‌دانیم که تمامی اهداف زره پوش نبوده و مطمئناً از تیرها در جهت از پا در آوردن سربازان سبک اسلحه و شکار نیز استفاده می‌شده است. اگر آثار بدست آمده از بافت تدفینی و اسلحه خانه‌ها را بیشتر مرتبط با اهداف غیر جنگی فرض کنیم و نمونه‌های پیدا شده از بافت درگیری و لایه‌های تخریب شده‌ی استحکامات این دوره را مرتبط با جنگ، طبق جامعه آماری معرفی شده در بخش اول سهم اهداف غیر جنگی به جنگی چیزی در حدود ۶ به ۱۳ می‌باشد، آنگاه کمبود گونه B در بافت تدفینی تقریباً منطقی به نظر می‌رسد. اما دلیل کمبود آن در بین آثار بافت جنگی نسبت به دیگر گونه‌ها چیست؛ می‌توان اینگونه تحلیل کرد که کمیت پایین گونه B بیانگر این مهم است که در دوره‌ی مورد بحث کمانداران با اهداف زرهی سنگین مواجههٔ چندانی نداشته‌اند. اگر این فرضیه را در نظر بگیریم، بدین معناست که استفاده از زره‌های پولکی حداقل تا قبل از قرن ۶ پ.م در ارتش‌های خاور نزدیک چندان مرسوم نبوده و سهم نیروهای سبک اسلحه به مراتب بیشتر بوده است. این فرضیه چندان دور از ذهن و غیر منطقی به نظر نمی‌رسد زیرا هم تهیه‌ی ارتشی تمام زرهی بسیار هزینه بر بوده و هم کمیت آثار پیدا شده در ارتباط با زره آن را تأیید می‌کند[۳۶]. از اواخر قرن ۶ پ.م به بعد روند برای دو گونه‌ی B و T به نوع دیگری ادامه پیدا می‌کند. شواهد نشان دهنده رواج گونه‌های جدیدی است که تلفیقی از نوک هرمی گونه‌ی B و مقطع سه گوش یا سه پره‌ی گونه T می‌باشد. این تغییر رفته رفته کامل تر شده و گونه‌ی بادکین سوکتی را خلق می‌کند (شکل ۱۲). البته رونق این گونه چه به صورت خاردار روی سوکت و چه بدون خار در مناطق شمالی دریای سیاه و استپ‌های اورآسیا از اواسط قرن ۷ پ.م شروع می‌شود. کمیت این گونه‌ی جدید از اواسط قرن ۶ پ.م افزایش پیدا کرده و به عنوان گونه‌ی استاندارد اقوام کوچگر استپ‌های شمال دریای سیاه تبدیل شده (Hellmuth, 2014; Cleuziou ,1977; Meliukova, 1964) و حضور آن در میان آثار هخامنشی و هلنی نیز دیده می‌شود[۳۷] البته گونه‌ی B نیز حیات خود را در دوران روم باستان ادامه می‌دهد و به یکی از گونه‌های رایج این دوره تبدیل می‌شود (Szudy, 2015).



شکل ۱۲. نمونه سرپیکانهای سه پره‌ی سوکتی با نوک هرمی مربوط به قرن ۴-۵ پ.م اولمپیا (Baitinger, 2011)

Figure. 12. Models of socketed Trilobate arrowhead with a pyramidal tip from the 4th-5th centuries BC

سپاسگزاری: در اینجا باید مراتب تشکر و قدردانی را از گروه مکانیک دانشگاه تهران بخصوص آقای دکتر علیرضا دانش مهر و دانشجویان ایشان داشته باشیم که فرآیند شبیه سازی را انجام داده و نویسندگان را در مراحل مختلف تحلیل داده ها کمک کردند.

مشارکت نویسندگان: تمامی نویسندگان در نگارش و اصلاح مقاله مشارکت داشته اند.

تضاد منافع: نویسندگان هیچگونه تضاد منافع را اعلام نمیکنند.

تامین مالی: هزینه های این پژوهش توسط نویسندگان تامین شده است.

دسترسی به داده ها و مواد: داده‌های خام پشتیبانی کننده نتایج این مقاله در صورت درخواست، توسط نویسندگان در دسترس قرار خواهد گرفت

پی نوشت

۱. جهت دسترسی به اطلاعات جامع در خصوص روش اجزاء محدود، بنگرید:
" The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals" by O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor (doi: https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9).
"Introduction to Finite Element Analysis and Design" by Nam-Ho Kim and Bhavani V. Sankar. (https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Finite+Element+Analysis+and+Design%2C+2nd+Edition-p-9781119078739)
"Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS" by Saeed Moaveni. (https://dl.acm.org/doi/10.5555/520534)

۲. (Angular or Triangular Bow) برای دسترسی به اطلاعات بیشتر در خصوص شواهد مادی از این کمان، بنگرید:(Mcleod, 1970) ؛ برای مطالعه بیشتر درباره ی شمائل نگاری کمان زاویه دار، بنگرید: (Wilkinson 1991; Zutterman, 2003; Szudy, 2015)

۳. برای مطالعه ی بیشتر در خصوص شواهد مادی این کمان، بنگرید: (Yamauchi, 1983; Brentjes, 1996; ЧЕРНЕНКОО, 1981; Dwyer, atarn.org)؛ برای دسترسی به اطلاعات در مورد شمائل نگاری، بنگرید: (Dan, 2013; Ivantchik, 1997)

۴. طبق آمار ارائه شده در پژوهش برگمن، انرژی اولیه کمان به تیرهای مختلف محاسبه و مقدار میانگین انتخاب شد.

۵. بلیث در پژوهش خویش میزان انرژی جنبشی تولید شده را با بهره گیری از محاسبات و مدل سازی ریاضی بدست آورده.

۶. به علت عدم دسترسی به نمونه های مشابه عصر آهنی جهت مستندنگاری دقیق، رونق این نمونه تا اواخر دوره ی هخامنشی و فرم خاص نوک این سرپیکان از نمونه ی هخامنشی جهت شبیه سازی استفاده شد. برای اطلاعات بیشتر به بخش(۴-۲) بنگرید.

۷. از لاچیش۱ در بافت محاصره ی آشوریان قرن ۸ پ.م (Gottlieb, 2004) و گرار۱(تل جمه)۶۰۰-۹۰۰پ.م(Petrie, 1928 ; Macalister, 1912)

۸. از اوروک و آشور (کاخ شلمنصر سوم) (Szudy, 2015)

۹. از تدفین در مارلیک (Negahban 1996) و مریان اواخر هزاره دوم و اوایل هزاره ی اول پ.م (Khalatbari, 1385)، دیلمان (Egami.N et al, 1965)، تالش (De Morgan, 1905)، حسنلو مربوط به لایه های IIIB و IV (Thornton & Pigott, 2011)، سیلک گورستان الف و ب (اواخر هزاره دوم و اوایل هزار اول پ.م (Ghrishman, 1379)، خوروین (Vanden Berghe, 1964)، زیویه (Ghrishman, 1954)، و محوطه های پشتکوه لرستان عصر آهن III (Overlaet, 2003)

۱۰. از آیانیس میانه قرن ۸ پ.م تا اوایل قرن ۷پ.م (Dern & Muscarella, 2001)، تپراک قله اوایل هزار اول پ.م (Wartke, 1990) و آلیشار هویوک۱ دوره ی هیتیت نو (Von der osten, 1937)

۱۱. در سیلک ب (Ghrishman, 1379)، مارلیک ۱۵۵۰ تا ۷۵۰ پ.م (Negahban, 1995)، محوطه های دوره ی آهن I و II پشتکوه لرستان (اواخر هزاره ی دوم و اوایل هزاره ی اول پ.م) (Overlaet, 2003)، توپراک قله (Wartke, 1990) و بسطام (Kroll, 1979) به تاریخ اوایل هزاره اول پ.م و محوطه ی لاچیش در لوانت قرن ۸ پ.م (Gottlieb, 2004)

۱۲. پرسپولیس (Schmidt, 1957)

۱۳. ممفیس (Knobel et al, 1911) و دفینه (Petrie, 1888)

۱۴. سارد (Waldbaum, 1983)

۱۵. ال مینا(Woolley, 1938) و گرار(Petrie, 1928)

۱۶. اولینتوس(Robinson, 1941 و ماراتون (Erdmann, 1973)

۱۷. برای مطالعه و شناخت گونه شناسی آثار بدست آمده از آسیای صغیر، جنوب قفقاز و ایران، بنگرید: (Cleuziou, 1977)؛ یونان، بنگرید: (Baitinger, 2011)؛ آثار بین النهرین، بنگرید: (szudy, 2015)

۱۸. برای مطالعهٔ بیشتر بنگرید: (De Backer, 2011-12, Barron, 2010 ،Hulit, 2002)

۱۹. نیمرود قرن ۹ پ.م (Stronach, 1958 ،Muscarella, 1988)، حسنلو (Muscarella, 1988)، لاچیش قرن ۸-۱۰ پ.م (Tufnell, 1953; Ussishkin, 1982)، ممفیس (Petrie, 1908) و دفینه (Petrie, 1888)

۲۰. این مقدار براساس اندازه گیری نمونه های به چاپ رسیده در گزارش (Stronach, 1958) تعیین شده است.

۲۱. برای مطالعهٔ بیشتر در مورد شمایل نگاری و تاریخ زره کتانی مراجعه شود به : (Aldrete et al, 2013)

۲۲. این فرمول از رابطه ی $\boldsymbol{R = KV^2}$ استخراج شده است. برای اطلاعات بیشتر بنگرید: (Blyth, 1977)

۲۳. محاسبه ی میزان کشش سطحی با استفاده از روش تونل باد توسط(Rodgers & Moffett 1935, Rheingans 1936, Hardy 1976)انجام شده است.

۲۴. محاسبه ی میزان کشش سطحی با روش آزمایش پرتاب توسط (English 1930) انجام شده است.

۲۵. برای اطلاعات بیشتر بنگرید:(Jones, 2009)

۲۶. بنگرید : (۹۲)

۲۷. برای جزئیات بیشتر بنگرید: (Aldrete et al, 2013) و آرشیو اینترنتی بیزلی دانشگاه آکسفورد: www.beazley.ox.ac.uk

۲۸. ۱۱/۲ mm زره + میزان تغییر شکل زره (ثابت نیست) + ۳ تا ۱ mm لباس + ۳۱ تا ۱۶ mm پوست و ماهیچه

۲۹. ۱۲ mm زره + میزان تغییر شکل زره (ثابت نیست) + ۳ تا ۱ mm لباس + ۳۱ تا ۱۶ mm پوست و ماهیچه

۳۰. گونه ی DI1 و DI2 در تقسیم بندی اردمان (Erdmann, 1973) و F12 در تقسیم بندی کلوزیو (Cleuziou ,1977).

۳۱. اگر تنها بافت جنگ را در نظر داشته باشیم، درصد حضور گونه ی B نسبت به L در درگیری های حسنلو ۱۲٪/۷، لاچیش ۴٪،نیمرود ۲/۶٪،آیانیس۷/۲٪،آشور۳۳/۳٪(داده ها مربوط به سالهای پایانی قرن ۷ ق.م می باشد) ، گرار ۲۶٪ و در میان آثار بدست آمده از بافتهای تدفینی چون خوروین ۲۰٪، سیلک ۲۱/۸٪، مارلیک ۲٪/۹ ، پشتکوه ۴/۲٪، مریان- تندوین ۹٪ می باشد. (این آمار طبق شواهد به چاپ رسیده است)

۳۲. ۵۶ ٪ از آثار بررسی شده متعلق به قبل از هزاره اول قبل از میلاد است. (براساس شواهد سایت های اشاره شده در بخشهای (۲-۳))

۳۳. به یافته های حسنلو (Dyson, 1965)، لاچیش (Tufnell, 1953)، نیمرود (Szudy, 2015)، آشور (Szudy, 2015)، گرار (Petrie, 1928) مراجعه شود.

۳۴. نسبت یافته های R به B چیزی در حدود ۶۲/۵٪ به ۳۷/۵٪ است، در حالیکه ۶۰٪ یافته های R و ۳۵/۵٪ یافته های B از بافت تدفین پیدا شده اند.

۳۵. درصد کلی حضور گونه ی B نسبت به گونه ی T ۳۹٪/۳ به ۶۰/۷٪ می باشد که از میان نمونه های B حدود ۲۶٪/۳ آن از بافت تدفین بدست آمده اند، در حالی که این درصد برای گونه ی T ۱۲٪/۸ است. (آمار براساس یافته های محوطه های پانویس ۵۴ می باشد)

۳۶. براساس بازسازی های انجام شده سه نکته حائز اهمیت است: ۱. وزن ۲. شواهد مادی ۳. شواهد تصویری؛ طبق متون کتابخانه نوزی، وزن متوسط ۱۶ گونه ی زره توصیف شده مقداری بین ۱۶/۵ تا ۲۴/۵ کیلوگرم می باشد. همچنین تعداد پولک های مورد نیاز جهت ساخت هر زره چیزی در حدود ۶۸۰ تا ۱۲۰۰ قطعه یا پولک می باشد (Dezső, 2002 ، Starr, 1939). در هیچ کدام از اسلحه خانه های کاوش شده در بازه پژوهش ما به طور

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

مثال نوزی، لاچیش، حسنلو و نیمرود، تعداد پولک های بدست آمده چندان قابل توجه نبوده است (Dezső, 2002). وجود شواهدی از زره پولکی در هیچ یک از گورهای عصر آهنی در ایران تاکنون گزارش نشده است.

در نهایت سنگ تراشی های کاخ های آشوری با اینکه رواج این زره را به نمایش گذاشته اند ولی با این حال منابع نوشتاری در این دوره اشاره چندانی به زره و نیروهای زرهی ندارند (Dezső, 2012a: 100)

۳۷. برای مطالعه بیشتر، بنگرید: (Cleuziou ,1977; Erdmann, 1973)

References

Aldrete, G. S., Bartell, S., & Aldrete, A. (2013). *Ancient linen body armor: Unraveling the linothorax mystery*. Johns Hopkins University Press. https://search.proquest.com/docview/2130991792/bookReader?accountid=45153

Alekseev, A. J. (2003). *Hronografija Evropejskoj Skifii VII–IV vekov do n.e.* Saint Petersburg.

Anderson, C. E., & Bodner, S. R. (1988). Ballistic impact: The status of analytical and numerical modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 7(1), 9-35. https://doi.org/10.1016/0734-743X(88)90010-3

Awerbuch, A., & Bodner, S. R. (1974). Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates. *International Journal of Solids and Structures*, 10, 671-684. https://doi.org/10.1016/0020-7683(74)90050-X

Baitinger, H. (2001). *Die Angriffswaffen aus Olympia* (Olympische Forschungen 29). Berlin/New York: Walter de Gruyter.

Barron, A. E. (2010). *Late Assyrian arms and armour: Art versus artifact* (Doctoral dissertation). University of Toronto. http://hdl.handle.net/1807/24677

Bergman, C., McEwen, E., & Miller, R. (1988). Experimental archery: Projectile velocities and comparison of bow performances. *Antiquity, 62*, 658–670. https://doi.org/10.1017/S0003598X00075050

Bleetman, A., & Dyer, J. (2000). Ultrasound assessment of the vulnerability of the internal organs to stabbing: Determining safety standards for stab-resistant body armour. *Injury*, 31, 609-612. https://doi.org/10.1016/S0020-1383(00)00061-9

Blyth, P. H. (1977). The effectiveness of Greek armour against arrows in the Persian War (490–479 BC): An interdisciplinary study [PhD Dissertation, University of Reading]. https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.450089

Boehmer, R. M. (1972). *Die Kleinfunde von Boğazköy, aus den Graungskampagnen 1931-1939 und 1952-1969*. Berlin: Gebr. Mann Verlag.

Borvik, T., Hopperstad, O. S., Berstad, T., & Langseth, M. (2001). Numerical simulation of plugging failure in ballistic penetration. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 6241-6264. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00343-7

Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S., & Malo, K. A. (2002). Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical, and conical noses, Part 1: Experimental study. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 19-35. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00034-3

Brentjes, B. (1995-1996). Waffen der Steppenvölker (II): Kompositbogen, Goryt und Pfeil – ein Waffenkomplex der Steppenvölker. *Archäologische Mitteilungen aus Iran, 28,* 179-210.

Brentjes, B. (1995–1996). Waffen der Steppenvölker (II): Kompositbogen, Goryt und Pfeil – ein Waffenkomplex der Steppenvölker. *Archäologische Mitteilungen aus Iran, 28*, 179–210.

Chernenko, E. V. (1981). *Scythian archers*. Scientific Thought.

Cleuziou, S. (1973). Les pointes de flèches „scythiques" au proche et moyen orient. In J. Deshayes (Ed.), *Le plateau iranien et l'Asie Centrale des origines à la conquête islamique. Leurs relations à la lumière des documents archéologiques* (pp. 187–199). Paris.

Corran, R. S. J., Shadbolt, P. J., & Ruiz, C. (1983). Impact loading of plates - An experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 1(1), 3-22. https://doi.org/10.1016/0734-743X(83)90010-6

Curtis, J. (2003). The Assyrian heartland in the period 612–539 BC. In Lanfranchi et al. (Eds.), *Continuity of Empire(?): Assyria, Media, Persia* (pp. 157–167). Padua.

Curtis, J., & Stronach, D. (1984). *Nush-i Jan III: The small finds*. British Institute of Persian Studies.

Dan, A. (2013). The Black Sea as a Scythian bow. In M. Manoledakis (Ed.), *Exploring the Hospitable Sea: Proceedings of the International Workshop on the Black Sea in Antiquity* (pp. 39–58). https://www.academia.edu/3751840

De Backer, F. (2012). Scale-armour in the Mediterranean area during the early Iron Age: A) From the IXth to the IIIrd century B.C. *Revue des études militaires anciennes (RÉMA), 5,* 1-38. https://www.academia.edu/6816233

De Morgan, J. M. (1905). *Histoire et travaux de la délégation en Perse du Ministère de l'instruction publique 1897-1905*. Paris: Leroux.

Dean, J., Dunleavy, C. S., & Brown, P. M. (2009). Energy absorption during projectile perforation of thin steel plates and the kinetic energy of ejected fragments. *International Journal of Impact Engineering*, 36, 1250-1258. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.002

Dehpahlavan, M. (1398). *Preliminary report of educational and research excavation of the Department of Archeology*. Tehran: University of Tehran. (Unpublished) (in Persian).

Dehpahlavan, M. (2018). Preliminary report of educational and research excavation of the Department of Archaeology, University of Tehran. (Unpublished) (in Persian).

Derın, Z., & Muscarella, O. W. (2001). Iron and bronze arrows. In Ç. Çılıngıroğlu & S. Salvini (Eds.), *Ayanis I: Ten years' excavations at Rusainili Eiduru-Kai, 1989–1998 (Documenta Asiana 6)* (pp. 189–217). Istituto per gli Studi Micenei ed Egeo-Anatolici CNR.

Dezső, D. (2012). *The Assyrian army, the structure of the Neo-Assyrian army as reconstructed from Assyrian palace reliefs and cuneiform sources (Vol. 1: Infantry)*. Budapest: Eötvös Loránd Press. https://www.academia.edu/2195169

Dezso, T. (2002). Scale armour of the 2nd millennium B.C. In T. A. Bacs (Ed.), *A tribute to excellence: Studies offered in honor of Erno Gaal, Ulrich Luft, Laszlo Torok* (pp. 195-216). Budapest Studia: Aegyptiaca XVII. https://www.academia.edu/19309982

Dyson, R. H. (1965). Hasanlu excavations, 1964. *Archaeology, 19*(2), 157–159.

Dyson, R. H. (1965). Problems of protohistoric Iran as seen from Hasanlu. *Journal of Near Eastern Studies, 24*(3), 193–217. https://www.jstor.org/stable/543123

Egami, N., Fukai, S., & Masuda, S. (1965). *Dailaman I: The excavations at Ghalekuti and Lasulkan, 1960*. Tokyo: Institute for Oriental Culture, University of Tokyo.

English, P. L. (1930). Exterior ballistics of the arrow. *Journal of the Franklin Institute*, 805-819.

Erdmann, E. (1973). Die sogenannten Marathonpfeilspitzen in Karlsruhe. *Archäologischer Anzeiger, 88*, 30–58.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

Forrestal, M. J., Luk, V. K., & Brar, N. S. (1990). Perforation of aluminum armor plates with conical-nose projectiles. *Mechanics of Materials*, 10, 97-105. https://doi.org/10.1016/0167-6636(90)90020-G

Ghirshman, R. (1954). *Village Perse-Achemenide.* Memoires de la Mission Archeologique en Iran (Vol. 36). Paris: Presses Universitaires de France.

Ghrishman, R. (1379). *Sialk* (A. Karimi, Trans.). Tehran: Organization of Iranian Cultural Heritage Publications.

Gibbs, M. (2006). Cultural site formation processes in maritime archaeology: Disaster response, salvage, and Muckelroy 30 years on. *International Journal of Nautical Archaeology*, 35(1), 4-19. https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2006.00088.x

Gottlieb, Y. (2004). The weaponry of the Assyrian attack, section A: The arrowheads and selected aspects of the siege battle. In D. Ussishkin (Ed.), *The renewed archaeological excavations at Lachish (1973-1994), Vol. IV* (pp. 1907-1969). Tel Aviv: Emery and Claire Yass Publications in Archaeology. https://www.academia.edu/36844576

Gupta, N. K., Iqbal, M. A., & Sekhon, G. S. (2006). Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt- and hemispherical-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 1921-1944. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.06.007

Hardy, R. (1976). *Longbow: A social and military history.* Cambridge. http://1.droppdf.com/files/wLXco/robert-hardy-longbow.pdf

Hein, A., Georgopoulou, V., Nodarou, E., & Kilikogiou, V. (2008). Koan amphorae from Halasarna – Investigations in a Hellenistic amphora production centre. *Journal of Archaeological Science*, 35(4), 1049-1061. https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.07.014

Hellmuth, A. (2008). The chronological setting of the so-called Cimmerian and early Scythian material from Anatolia. *Ancient Near Eastern Studies, 45*, 102–122. https://doi.org/10.2143/ANES.45.0.2033166

Hellmuth, A. (2014). Horse, bow and arrow – A comparison between the Scythian impact on the Mediterranean and on Eastern Middle Europe. *Mediterranean Review, 7*(1), 1–38. https://www.academia.edu/8148653

Hernandez, C. J., Loomis, D. A., Cotter, M. M., Schifle, A. L., Anderson, L. C., Elsmore, L., Kunos, C., & Latimer, B. (2009). Biomechanical allometry in hominoid thoracic vertebrae. *Journal of Human Evolution*, 56, 462-470. https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.12.007

Hulit, T. D. (2002). Late Bronze Age scale armour in the Near East: An experimental investigation of materials, construction, and effectiveness, with a consideration of socio-economic implications [PhD Dissertation, University of Durham]. http://etheses.dur.ac.uk/1006/

Hutton, D. (2004). *Fundamentals of finite element analysis.* New York: McGraw Hill. https://www.academia.edu/37959207/Fundamentals_of_finite_elements_David_V_Hutton

Ivantchik, A. (1997). Das Problem der ethnischen Zugehörigkeit der Kimmerier und die kimmerische archäologische Kultur. *Prähistorische Zeitschrift, 72,* 12-53. https://doi.org/10.1515/prhz.1997.72.1.12

Ivantchik, A. (2006). "Scythian" archers on archaic Attic vases: Problems of interpretation. *Ancient Civilizations from Scythia to Siberia, 12*, 196–271. https://doi.org/10.1163/157005706779851408

Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), 31-48. https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9

Jones, M. R. (2009). *Deformation theory of plasticity.* Virginia: Bull Ridge Publishing.

Karpowicz, A., & Selby, S. (2010). Scythian-style bows discovered in Xinjiang. *The Journal of the Society of Archer-Antiquaries, 53.* https://atarn.org/chinese/Yanghai/Scythian_bow_ATARN.pdf

Khalatbari, M. R. (1383). *The archaeological excavations in Talesh ancient sites (Marian-Tandvin).* Tehran: Organization of Iranian Cultural Heritage Publications.

Kilikoglou, V., & Vekinis, G. (2002). Failure prediction and function determination of archaeological pottery by finite element analysis. *Journal of Archaeological Science*, 29(12), 1317-1325. https://doi.org/10.1006/jasc.2001.0775

Knobel, E. B., Midgley, W. W., Milne, J. G., Murray, M. A., & Petrie, W. M. F. (1911). *Historical studies.* Publications of the British School of Archaeology in Egypt 19. London: School of Archaeology in Egypt. http://www.etana.org/sites/default/files/coretexts/15113.pdf

Kroll, S. (1979). Die Kleinfunde. In W. Kleiss (Ed.), *Bastam I: Ausgrabungen in den urartäischen Anlagen, 1972–1975 (Teheraner Forschungen IV)* (pp. 151–182). Mann. https://www.academia.edu/32130642

Kupczik, K. (2008). Virtual biomechanics: Basic concepts and technical aspects of finite element analysis in vertebrate morphology. *Journal of Anthropological Sciences*, 86, 193-198. https://www.researchgate.net/publication/40027812_Virtual_biomechanics_Basic_concepts_and_technical_aspects_of_finite_element_analysis_in_vertebrate_morphology

Kupczik, K., Dobson, C. A., Crompton, R. H., Phillips, R., Oxnard, C. E., Fagan, M. J., & O'Higgins, P. (2009). Masticatory loading and bone adaptation in the supraorbital torus of developing macaques. *American Journal of Physical Anthropology*, 139(2), 193-203. https://doi.org/10.1002/ajpa.20972

Landkof, B., & Goldsmith, W. (1985). Petalling of thin metallic plates during penetration by cylindro-conical projectiles. *International Journal of Solids and Structures*, 21(3), 245-266. https://doi.org/10.1016/0020-7683(85)90021-6

Levy, R. M., & Dawson, P. (2009). Using finite element methods to analyze ancient architecture: An example from the North American Arctic. *Journal of Archaeological Science*, 36(10), 2298-2307. https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.06.014

Lubowiecka, I., Armesto, J., Arias, P., & Lorenzo, H. (2009). Historic bridge modeling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*, 31(11), 2667-2676. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.06.018

Macalister, R. A. S. (1912). *The excavation of Gezer 1902-1905 and 1907-1909* (Vols. I-III). London. http://www.etana.org/sites/default/files/coretexts/14872.pdf

McLeod, W. (1970). *Composite bows from the tomb of Tutankhamun.* Oxford University Press.

Medvedskaya, I. N. (1982). *Iran: Iron Age I (BAR International Series 126).* British Archaeological Reports.

Moorey, P. R. S. (1971). *Catalogue of ancient Persian bronzes in the Ashmolean Museum.* Oxford: Clarendon Press.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

Muscarella, W. O. (1988). *Bronze and iron: Ancient Near Eastern artifacts in The Metropolitan Museum of Art*. New York: The Metropolitan Museum of Art. https://www.metmuseum.org/art/metpublications/Bronze_and_Iron_Ancient_Near_Eastern_Artifacts_in_The_Metropolitan_Museum_of_Art

Negahban, E. O. (1996). *Marlik: The complete excavation report*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. https://www.upenn.edu/pennpress/book/13684.html

O'Shea, J. M. (2002). The archaeology of scattered wreck-sites: Formation processes and shallow water archaeology in Western Lake Huron. *International Journal of Nautical Archaeology*, 31(2), 211-227. https://doi.org/10.1006/ijna.2002.1044

Oates, D. (1961). The excavations at Nimrud (Kalhu), 1960. *Iraq, 23*(1), 1–14. https://doi.org/10.2307/4199694

Overlaet, B. (2003). *The early Iron Age in Pusht-i Kuh, Luristan* (K. A. Niknami & A. S. Mucheshi, Trans.). Tehran: SAMT.

Petrie, W. M. F. (1888). *Tanis Part II: Nebesheh and Defenneh (Tahpanhes)*. London: The Egypt Exploration Fund. https://doi.org/10.11588/diglit.3236

Petrie, W. M. F. (1909). *Memphis I*. Publications of the Egyptian Research Account 15. London: British School of Archaeology in Egypt. https://doi.org/10.11588/diglit.3349

Petrie, W. M. F. (1928). *Gerar*. London: British School of Archaeology in Egypt. http://etana.org/sites/default/files/coretexts/15143.pdf

Ravid, M., & Bodner, S. R. (1983). Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles. *International Journal of Engineering Science*, 21, 577-591. https://doi.org/10.1016/0020-7225(83)90105-2

Rey, F. E. (2010). Weapons, technological determinism, and ancient warfare. In G. Fagan & M. Trundle (Eds.), *New Perspectives on Ancient Warfare* (pp. 21–56). Brill. https://doi.org/10.1163/ej.9789004185982.i-391.8

Rheingens. (1936). Exterior and interior ballistics of bows and arrows – Review. *Archery Review*.

Richmond, B. G., Wright, B. W., Grosse, I., Dechow, P. C., Ross, C. F., Spencer, M. A., & Strait, D. S. (2005). Finite element analysis in functional morphology. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 283A(2), 259-274. https://doi.org/10.1002/ar.a.20169

Robinson, D. M. (1941). *Excavations at Olynthus, Part X: Metal and minor miscellaneous finds, an original contribution to Greek life*. Baltimore: Johns Hopkins Press.

Rodgers, P., & Moffett, D. (1935). The bow as a missile weapon. *Army Ordnance*. U.S. publication.

Rolle, R. (1989). *The Scythian world* (F. G. Walls, Trans.). University of California Press.

Schmidt, E. F. (1957). *Persepolis II: Contents of the Treasury and Other Discoveries*. Oriental Institute Publications 69. Chicago: University of Chicago Press. https://oi.uchicago.edu/sites/oi.uchicago.edu/files/uploads/shared/docs/oip69.pdf

Schmidt, K. (2002). *Norşuntepe, Kleinfunde II: Artefakte aus Felsgestein, Knochen und Geweih, Ton, Metall und Glas (Archaeologica Euphratica 2)*. Mainz am Rhein: Verlag Philipp von Zabern. http://digital.library.stonybrook.edu/cdm/ref/collection/amar/id/66389

Selby, S. (2005). Drawings of the Yanghai bows. *ATARN.org*. https://www.atarn.org/chinese/Yanghai/yanghai.htm

Starr, R. F. S. (1939). *Nuzi (Vol. I)*. Cambridge, MA: Harvard University Press. http://digital.library.stonybrook.edu/cdm/ref/collection/amar/id/47411

Stronach, D. (1958). Metal objects from the 1957 excavations at Nimrud. *Iraq, 20*, 169–181. https://www.jstor.org/stable/4199639

Stronach, D. (1978). *Pasargadae: A report on the excavations conducted by the British Institute of Persian Studies from 1961 to 1963*. Oxford: Clarendon Press. http://digital.library.stonybrook.edu/cdm/ref/collection/amar/id/69438

Szudy, J. (2015). Archery equipment in the Neo-Assyrian period [PhD Dissertation, University of Wien]. https://www.academia.edu/15611257

Tan, V. B. C., Lim, C. T., & Cheong, C. H. (2003). Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry. *International Journal of Impact Engineering*, 28(2), 207-222. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00055-6

Thomson, T. (1955). An approximate theory of armour penetration. *Journal of Applied Physics*, 26(1), 80-82. https://doi.org/10.1063/1.1721868

Thornton, C. P., & Pigott, V. C. (2011). Blade-type weaponry of Hasanlu Period IVB. In M. de Schauensee (Ed.), *Peoples and Crafts in Period IVB at Hasanlu, Iran* (pp. 135–182). University of Pennsylvania Press. https://www.upenn.edu/pennpress/book/14818.html

Tufnell, O. (1953). *Lachish III (Tell ed-Duweir): The Iron Age*. Oxford University Press.

Ussishkin, D. (1982). *The conquest of Lachish by Sennacherib*. Tel Aviv: Tel Aviv University.

Vanden Berghe, L. (1964). *La Nécropole de Khurvin*. Istanbul: Nederlands Historisch-Archaeologisch Instituut in Het Nabije Oosten.

von der Osten, H. H. (1937). *The Alishar Hüyük seasons of 1930-1932, Part 2*. Chicago: University of Chicago Press. https://oi.uchicago.edu/sites/oi.uchicago.edu/files/uploads/shared/docs/oip29.pdf

Waldbaum, J. C. (1983). *Metalwork from Sardis: The finds through 1974* (Sardis Monograph 8). Cambridge, MA: Harvard University Press. http://digital.library.stonybrook.edu/cdm/ref/collection/amar/id/31836

Wartke, R. B. (1990). *Toprakkale: Untersuchungen zu den Metallobjekten im Vorderasiatischen Museum zu Berlin*. Berlin: Akademie Verlag.

Wierzbicki, T. (1999). Petalling of plates under explosive and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 935-954. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00028-7

Wilkinson, H. R. (1991). The representation of the bow in the art of Egypt and the Ancient Near East. *Journal of the Ancient Near Eastern Society, 20*(1), 83–99. https://janes.scholasticahq.com/article/2366-the-representation-of-the-bow-in-the-art-of-egypt-and-the-ancient-near-east

Winter, I. J. (1989). The Hasanlu gold bowl: Thirty years later. *Expedition, 31*(2–3), 87–106.

Woolley, C. L. (1921). *Carchemish, Part II: The town defences*. British Museum. http://digital.library.stonybrook.edu/cdm/ref/collection/amar/id/156870

Woolley, L. (1938). The excavations at Al Mina, Sueidia. *The Journal of Hellenic Studies, 58*(2), 133-170. https://doi.org/10.2307/627300

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.101]
Downloaded from mail.jra-tabriziau.ir at 3:31 +0330 on Sunday August 9th 2026

Yamauchi, E. (1983). The Scythians: Invading hoards from the Russian steppes. *The Biblical Archaeologist, 46*(2), 90–99. https://doi.org/10.2307/3209645

Zaid, A., & Paul, R. (1957). Mechanics of high speed projectile perforation. *Journal of the Franklin Institute*, 117-126. https://doi.org/10.1016/0016-0032(57)90892-X

Zutterman, C. (2003). The bow in the Ancient Near East: A re-evaluation of archery from the late 2nd Millennium to the end of the Achaemenid Empire. *Iranica Antiqua, 38*, 119–165. https://doi.org/10.2143/IA.38.0.137

Мелюкова, А.И. (1964). Вооружение скифов. *САИ* (Д1–4). Наука. https://www.archaeolog.ru/ru/el-bib/el-cat/el-series/svod-arch/sai-d1-4

Jalili, S. & Dehpahlavan, M. (2025). Assessment of the Arrowhead Impact on Armor Using the Finite Element Method (FEM): A Case Study of Iron Age II and III Arrowheads from the Qareh Tepe Segzabad Cemetery. *Journal of research on Archaeometry, 11*(1), 11101. DOI: 10.61882/jra.2025.11.101