

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 939-942 DOI:10.22060/mej.2020.18593.6857

Numerical analysis of shaped charge jet penetration into discrete concrete targets using LS-DYNA and ANSYS-AUTODYN

H. Mehmannavaz¹, A. Ramezani², G. Liaghat³, H. Fazeli^{*4}, M. Rouhbakhsh⁵, M. A. Nabakhteh⁵

¹ Mechanical Engineering Department, Mechanical, Electrical and Computer Engineering Faculty, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

³ Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁴ Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

⁵ Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Tehran University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Discrete concrete targets show more resistance to penetration against shaped charges. The purpose of this study is to simulate the penetration of shaped charge in discrete concrete targets using LS-DYNA and ANSYS-AUTODYN and compare the results. For this purpose, the simulation process for one of the experimental results is performed and the results obtained from both software are validated. Finally, the results of two software in the fields of jet velocity, penetration depth, entry diameters, middle and exit crater, and run time are compared. Application of the ALE method for jet elements and the RHT concrete model to simulate the concrete behavior at high strain rates yielded good results. Differences in numerical solution method and command differences in the interaction of the Lagrangian and Eulerian elements in two software caused the depth of penetration in ANSYS-AUTODYN to be less than the LS-DYNA and the diameters of entry, middle and exit crater in ANSYS-AUTODYN become larger than the LS-DYNA and closer to the experimental results. The results of the two software are in good agreement with the experimental results. Continuous concrete was also simulated and it was found that the penetration depth of discrete concrete was lower than continuous concrete.

Review History:

Received: Jun. 30, 2020 Revised: Nov. 06, 2020 Accepted: Nov. 14, 2020 Available Online: Nov. 27, 2020

Keywords:

Shaped charge Discrete concrete targets Numerical analysis LS-DYNA, ANSYS-AUTODYN

1-Introduction

A cone-shaped container filled with explosives at one end and a detonator at the other end is called shaped charge. The shaped charges show a remarkable penetration in targets and a remarkable penetration-to-destruction ratio, as well. In peaceful applications, shaped charges are used for excavation, while in military applications, they are used against safe structures and various types of armors.

Concrete is widely used for the construction of safe structures. One of the methods to secure these structures is to use discrete concrete structures. Therefore, the need to analyze and secure these structures against impact and penetration has been considered.

Previous studies have shown that discrete targets are more durable against high-velocity projectiles and result in a lower penetrated depth compared to the uniform targets [1,2]. However, the velocity of the projectile in these studies is much lower than the shaped charge, and a few studies have been performed in this field.

The purpose of this study is to compare the results of the analysis of the formation and penetration of the shaped charge in discrete concrete targets using LS-Dyna and Ansys-Autodyn software. So far, various models such as RHT and

Johnson-Holmquist models have been proposed to simulate the behavior of concrete at high strain rates. Each of these models has shown acceptable results in various studies.

In order to validate the simulation results, the experimental results of Wang et al. [3] were used and then, considering the existing relations for cut-off velocity, important parameters in the study of the shaped charge penetration process (including penetration depth, crater diameter of the hole, and jet tip velocity) have been examined and compared.

2- Numerical Simulation

Regarding the axial symmetry in the geometry of the shaped charge and target, the problem is modeled as s 2D case with axial symmetry to reduce significantly the calculation and runtime duration. ALE elements have also been used to simulate explosives, liners, and the air. The advantage of using the ALE elements rather than the Eulerian ones is the deformation of the elements, which reduces the displacement of the material and the solving duration [4]. Concrete target elements are also defined as Lagrangian ones. Table 1 shows the strength model and the considered equation of state of different components of the shaped charge in the two software.

*Corresponding author's email: hamidfazeli1985@gmail.com



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. Setup of the test [3]



Fig. 2: Hole crater of the first target [3]

3- Results and Discussion

In order to validate the simulations, the experimental results Wang et al.'s study [3] were used. Fig. 1 shows the setup of Wang et al.'s experimental study, and Fig. 2 shows the penetration in the first target. The jet tip velocity at the moment of touching the target, hole diameter, and penetration depth are compared in Table 1. To calculate the penetration depth, the simulation is stopped right at the moment that the jet reaches the cut-off velocity. Using the results of Murphy's study [5], the cut-off velocity of copper penetration in the concrete is 1430 m/s.

In addition to the penetration depth, some other parameters are also important. Among these parameters are the diameter of the entry, the middle, and the output diameters. As can be seen in Table 1, Ansys-Autodyn calculated the middle diameter as 15 mm larger than the experimental value, while LS-Dyna calculated it as 15 mm smaller.

This could be due to differences in the interaction between Lagrangian and Eulerian elements in the two software. In the jet penetration process, it seems that the Ansys Autodyn couples more Lagrangian elements of the target with Eulerian jet elements. The same holds for the output diameter, and the output diameter in the Ansys-Autodyn simulation is 20 mm larger than that of LS Dyna, which, of course, is more consistent with the experimental results.

4- Conclusions

The use of the ALE method to simulate the process of penetration of the shaped charge jet in the concrete was efficient in both LS-Dyna and Ansys-Autodyn software and makes use of the advantages of both Lagrangian and Eulerian methods. The results obtained from the RHT concrete model show the efficiency of this model for simulation of the behavior of concrete in loads with a high strain rate.

The jet tip velocities in both software are very close to each other and show relatively good agreements with the generalized PER theory. The concrete damage parameter in LS-Dyna gives reasonable results for concrete destruction and the entry, middle, and output crater diameter. In Ansys-Autodyn, the radial cracks created in the concrete provide a good pattern of the amount of damage and destruction.

The differences between the numerical solution methods used in the two software and the differences in the interaction method of Lagrangian and Eulerian elements in the two software resulted in a smaller penetration depth in Ansys-Autodyn than that of LS-Dyna, and higher entry, output and middle crater diameters in Ansys-Autodyn than those of LS-Dyna, as well. The penetration depth in LS-Dyna, and the entry, middle and output crater diameters resulted from Ansys-Autodyn were closer to the experimental results.

Regarding the reasonable results of both software, it is acceptable to use either of these two software so as to simulate the shaped charge penetration process and there are not much differences between the results. The LS-Dyna software is faster in solving the problems, and has more controlling capabilities for material models and command codes (especially the Lagrangian and Eulerian elements interaction), while the advantage of Ansys-Autodyn software is its easier simulating process and achieving acceptable accuracies for longer solving runtimes.

Totally, the comparison between the results of the simulations of discrete and uniform concrete targets indicates the reduction of the penetration depth in concrete, which is because of the discrete design of concrete target.

Table 1. Comparison of simulation and experimental results

parameter	Jet tip velocity (m/s)	Entry diameter of the hole crater (mm)	Penetration depth (mm)
Experiment [3]	7494	180	538
Ansys-Autodyn	5910	164	420
Error of Ansys- Autodyn	21%	9%	22%
LS-Dyna	6108	162	470
Error of LS- Dyna	18%	10%	13%

References

- T. Shirai, A. Kambayashi, T. Ohno, H. Taniguchi, M. Ueda, N. Ishikawa, Experiment and numerical simulation of double-layered RC plates under impact loadings, Nuclear engineering and design, 176(3) (1997) 195-205.
- [2] P.M. Booker, J.D. Cargile, B.L. Kistler, V. La Saponara, Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts, International Journal of Impact Engineering, 36(7) (2009) 926-939.
- [3] C. Wang, W. Xu, S.C.K. Yuen, Penetration of shaped charge into layered and spaced concrete targets, International Journal of Impact Engineering, 112 (2018) 193-206.
- [4] D.J. Benson, an efficient, accurate, simple ALE method for nonlinear finite element programs, Computer methods in applied mechanics and engineering, 72(3) (1989) 305-350.
- [5] M.J. Murphy, Shaped-charge penetration in concrete: a unified approach, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1983.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Mehmannavaz, A. Ramezani, G. Liaghat, H. Fazeli, M. Rouhbakhsh, M. A. Nabakhteh, Numerical analysis of shaped charge jet penetration into discrete concrete targets using LS-DYNA and ANSYS-AUTODYN, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 939-942.





This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۹۵۳ تا ۳۹۷۰ DOI: 10.22060/mej.2020.18593.6857

تحلیل عددی نفوذ خرج گود در اهداف بتنی گسسته با استفاده از نرمافزارهای ال اس داینا و انسیس–اتوداین

حسين مهمان نواز^۱، على رمضاني^۲، غلامحسين لياقت^۳، حميد فاضلى^۴، محسن روح بخش^۵، محمدامين نباخته^۵

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه اَزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۵– دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه: یکی از روشهای ایمنسازی اهداف بتنی در برابر تهدیدهای خرج گود، گسسته سازی آنها است. هدف از این پژوهش شبیهسازی فرآیند نفوذ خرج گود در اهداف بتنی گسسته، در دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس⊣توداین است. بدین منظور، فرآیند شبیهسازی برای یکی از نتایج تجربی موجود، انجام شده و نتایج بدستآمده در هر دو نرمافزار، صحت سنجی شده اند. در انتها نتایج دو نرمافزار در زمینههای سرعت جت، عمق نفوذ، قطر دهانه ورودی، میانی، خروجی و زمان اجرا مقایسه شده است. استفاده از روش
آ⊣ل⊣ی برای فرآیند شکل گیری جت، و مدل آر⊣چ-تی برای شبیهسازی رفتار بتن در نرخ کرنش های بالا نتایج مناسبی در هر دو
نرمافزار بدست داد. تفاوتهای روش برهم کنش المانهای لاگرانژی و اویلری در دو نرمافزار، باعث شد تا عمق نفوذ بدست آمده
در انسیس اوداین، از الاسداینا کمتر و قطر دهانههای ورودی، خروجی و میانی در انسیس اوداین نسبت به الاسداینا بیشتر باشد.
عمق نفوذ در الاسداینا، و قطر دهانههای ورودی، خروجی و میانی در انسیس-اتوداین به نتایج تجربی نزدیکتر بودند. شبیهسازی بتن
پیوسته نیز انجام شد و مشاهده گردید که عمق نفوذ خرج گود در بتن گسسته از بتن پیوسته کمتر است. نتایج بدست آمده نشان از
تطابق خوب نتایج دو نرمافزار با مقادیر تجربی دارد.

۱- مقدمه

یک محفظه پرشده از ماده منفجره با شکل مخروطی در یک انتها و یک چاشنی در انتهای دیگر آن، خرج گود نامیده میشود. خرج گودها قابلیت نفوذ بسیار بالایی داشته و نسبت نفوذ به تخریب آنها قابل توجه است. خرج گودها دارای کاربردهای وسیعی در صنایع نظامی و غیرنظامی هستند. در کاربردهای غیرنظامی برای حفاری، و در کاربردهای نظامی در برابر سازههای امن و انواع مختلف زره مورد استفاده قرار می گیرند.

تحلیل مسائل شکل گیری و نفوذ پرتابههای حاصل از خرج گود دارای پیچیدگی زیادی است که انفجار ماده منفجره، انتشار موج شوک درون ماده منفجره و اصابت به آستری، تغییر فرم و شکل گیری آستری و در پایان، اصابت آن به سطح هدف و نفوذ در آن تا توقف کامل را شامل می شود.

از بتن به شکل گسترده در ساخت سازههای امن استفاده می شود. یکی از

روشهای ایمنسازی اهداف بتنی، گسستهسازی آنها است. با توجه به مورد اصابت قرارگرفتن این سازهها، در سالهای اخیر لزوم تحلیل و ایمنسازی آنها در برابر ضربه و نفوذ مورد توجه قرار گرفتهاست.

با توجه به کمهزینهبودن شبیهسازی در نرمافزارهای کامپیوتری و کدهایی که در این زمینه توسعه داده شده، در دو دهه اخیر استفاده از شبیهسازی در کنار آزمایشهای تجربی رشد قابلتوجهی داشته و اکثر پژوهشهای انجامشده در زمینه خرج گود، شامل شبیهسازی هستند. دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس اتوداین رایجترین نرمافزارهای مورد استفاده در زمینه شبیهسازی فرآیند شکلگیری و نفوذ خرج گود هستند. هدف این پژوهش نیز مقایسه بین نتایج این دو نرمافزار است. تاکنون مدلهای مختلفی چون آر اچ -تی و جانسون هولمکوئست برای شبیهسازی رفتار بتن در نرخ کرنش بالا ارائه شده که هر یک نتایج قابل قبولی در مطالعات

1 RHT

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: hamidfaz2000@yahoo.com

مختلف نشان دادهاند.

رسنیاسکی و همکاران [۱] در پژوهش خود به مقایسه نتایج تجربی با مدلسازی نفوذ خرج گود در بتن در ال اس داینا پرداختند. آن ها اثرات ارتفاع ماده منفجره، زاویه آستری و فاصله توقف را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند، بعد از برخورد جت با هدف بتنی که در پوستهای از فولاد قرار داشت، یک خرابی بزرگ در جلو و یک خرابی بزرگ در پشت هدف ایجاد و یک سوراخ سرتاسری نیز ایجاد می شد. بررسی ها نشان می داد که خصوصیات این سوراخ سرتاسری بیشترین تطابق را با نتایج تجربی داشت.

فنگ هو و همکاران [۲] نیز نتایج شبیهسازی با ال اس داینا را با نتایج ۴ مقاله تجربی دیگر مقایسه کرده و در نهایت به بررسی چند پارامتر پرداختهاند. آنها برای شبیهسازی بتن از مدل جانسون هولمکوئست و از المانهای آ–ال–ای^۱ استفاده کرده و مشاهده کردند نتایج نرمافزار با نتایج تجربی تطابق نسبتاً خوبی دارند.

ژنگو و همکاران [۳] نیز به بررسی دو مدل بتن برای شبیه سازی بار گذاری با نرخ کرنش بالا در دو نرمافزار انسیس اتوداین و ال اس داینا پرداختند. آن ها مدل آر –اچ – تی در نرمافزار انسیس اتوداین را با مدل آسیب بتون^۲ در نرمافزار ال اس داینا مورد مقایسه قرار دادند. آن ها با ارائه ی یک اصلاحیه برای مدل آر – اچ – تی در نرمافزار انسیس اتوداین، نشان دادند که این مدل اصلاحشده بهترین قابلیت را برای پیش بینی رفتار بتن در بارگذاری های با نرخ کرنش بالا دارد.

دشتیان گرامی و همکاران [۴] به شبیهسازی نفوذ پرتابهی دو مرحله ای در بتن با نرمافزار انسیس اتوداین پرداختند که مرحله اول این پرتابه شامل یک خرج گود پیشرو با آستری مسی و هندسه مخروطی بود. آنها برای مدلسازی بتن از مدل جانسون هولمکوئست استفاده کرده و تطابق خوبی با نتایج تجربی بدست آوردند.

فرآیند تشکیل جت حاصل از خرج گود، یک فرآیند پیچیده در نرخ کرنش بسیار بالا است که تئوری آن برای اولین بار توسط بیرخوف و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفت. در این تئوری، فرض بر این است که موج انفجار، فشار بسیار زیادی تولید میکند به صورتی که استحکام آستری در برابر آن قابل صرفنظر بوده و آستری به صورت یک سیال غیر ویسکوز و غیر قابل تراکم در نظر گرفتهمی شود.

در فرآیند نفوذ نیز مقاومت هدف در برابر نفوذ، به نیروهای اینرسی وابسته بوده و از اثرات مقاومت، لزجت و تراکم پذیری صرف نظر می شود. بر

اساس این تئوری آزمایشهای بسیاری انجام شده و نتایج نسبتاً قابل قبولی بدست آمدهاست [۸–۶]. اختلافات موجود در نتایج نیز به وسیله برهم کنش جت با دیوارههای هدف توجیه شدهاست. زیرا این برهم کنش، در این تئوری نادیده گرفته شده و از آن صرفنظر می شود [۱۰ و ۹].

در تحلیل فرآیند نفوذ خرج گود در هدف، از تئوری هیدرودینامیک استفاده می شود. عمق نفوذ بدست آمده از این تئوری غالباً بیشتر از مقادیر تجربی است. محققان یکی از دلایل این مسئله را متوقف شدن فرآیند نفوذ در هدف بعد از رسیدن به سرعت مشخصی می دانند و این سرعت را، سرعت قطع نفوذ نامیدهاند [۱۱]. برای بدست آوردن نتایج قابل قبول در شبیه سازی فرآیند نفوذ خرج گود در هدف، درنظر گرفتن سرعت قطع نفوذ نیز دارای اهمیت است.

زلاتین و همکاران [۱۲] و کوژشکو و همکاران [۱۳] به بررسی محدودیتهای تئوری هیدرودینامیک پرداختند. بر اساس پژوهشهای آنها، هر تئوری که بر این اساس شکل بگیرد تا زمانی معتبر خواهد بود که سرعت نفوذ در محدوده مشخصی قرار بگیرد. محدوده بالایی یک سرعت فراصوت نفوذ است که در آن اثرات تراکمپذیری غیر قابل صرفنظر هستند. محدوده پایین سرعت نیز، سرعتی است که در آن نیروهای ناشی از اینرسی با نیروهای استحکام هدف قابل مقایسه بوده و دیگر نمی توان از استحکام ماده صرفنظر کرد.

دی پرسیو و همکاران [۱۱] برای اولین بار به توسعه یک رابطهی تجربی برای سرعت قطع نفوذ پرداختند. سپس هانکاک [۱۴] با تکمیل این رابطه اثرات سرعتهای جانبی را لحاظ نمود. علاوه بر روابط تجربی، روابط هندسی نیز برای تخمین سرعت قطع نفوذ توسعه داده شده است که در آنها یک توزیع یکنواخت برای سرعتهای جانبی جت در طول در نظر گرفته می شود [۱۶ و ۱۵] هرچند که این فرض نیز کاملاً صحیح نیست.

در پژوهشهای قبلی انجامشده توسط نگارندگان این مقاله [۱۷–۱۹]، شبیهسازی نفوذ خرج گود در اهداف فولادی پیوسته، فولادی گسسته و بتنی پیوسته در نرمافزار انسیس اتوداین انجام شدهاست. با توجه به اهمیت سازههای بتنی گسسته، در این پژوهش این نوع اهداف مورد بررسی قرار گرفتهاند. اگرچه در برخی مسائل با نرخ کرنش بالا بین دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس اتوداین مقایسه انجام شده [۳]، ولی تاکنون بین دو نرمافزار در فرآیند نفوذ خرج گود مقایسهای صورت نگرفتهاست. با توجه به نقش شبیهسازی در فرآیند طراحی خرج گود و سازههای مقاوم، نتایج این مقایسه می تواند حائز اهمیت باشد. هدف از این پژوهش مقایسه نتایج شبیهسازی فرآیند نفوذ خرج

ALE

² Concrete damage model

گود در اهداف بتنی گسسته در دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس اتوداین است. بدین منظور شبیه سازی با توجه به نتایج تجربی پژوهش وانگ و همکاران [۲۰]، انجام شده و سپس با درنظر گرفتن روابط موجود برای سرعت قطع، پارامترهای مهم در بررسی فرآیند نفوذ خرج گود شامل عمق نفوذ، قطر دهانه و سرعت نوک جت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتهاند.

تاکنون در چند پژوهش، اثر گسستهسازی بتن مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که اهداف گسسته عمق نفوذ کمتری در مقایسه با اهداف پیوسته دارند [۲۲ و ۲۱]. ولی سرعت پرتابه در این پژوهش ها در حدود ۳۰۰ m/s بوده و بر روی خرج گود پژوهشهای محدودی صورت گرفتهاست. در این پژوهش، به منظور بررسی اثر گسستهسازی بتن در افزایش مقاومت هدف در برابر نفوذ، بتن پیوسته در دو نرمافزار شبیهسازی شده است.

۲- تئوری

در این قسمت از پژوهش به معرفی برخی تئوریهای پایهای و کاربردی در زمینه فرآیند شکل گیری و نفوذ خرج گود که در این مقاله استفاده شده، پرداخته میشود. مفاهیمی چون تشکیل جت، نفوذ هیدرودینامیکی، مدل بتن آر-اچ-تی و سرعت قطع نفوذ در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرند.

۲- ۱- مدل تشکیل جت

برای بررسی تحلیلی فرآیند تشکیل جت، تئوریهای مختلفی وجود دارد. تئوری تعمیمیافته پِر، پرکاربردترین تئوری در این زمینه محسوب می شود. در تئوری پر، موج انفجار به صورت صفحه ای در نظر گرفته شده و در مدل اصلاح شده آن، اثرات شروع نقطه انفجار نیز در نظر گرفته شده است. هندسه حاکم بر این مدل سازی در شکل ۱ آمده است. سرعت جت در مدل پر، طبق رابطه (۱) تعریف می شود [۲۳].

$$V_{j} = \frac{V_{0}}{\sin\frac{\beta}{2}}\cos(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \tag{1}$$

در رابطه (۱)، V_0 سرعت فروپاشی، α زاویه بین مماس بر آستری و محور تقارن است. محور تقارن، β زاویه بین امتداد فروپاشی دیواره آستری و محور تقارن است. همچنین δ زاویه تیلور نامیده می شود که در مدل تعمیمیافته پر با استفاده از رابطه (۲) بیان می شود.



Fig. 1. Geometrical model of jet formation [20]

$$\sin \delta = \frac{V_0 \cos \varepsilon(x)}{2U_D} \tag{(7)}$$

در رابطه (۲)، $U_{\rm D}$ سرعت انفجار ماده منفجره و $\left(x \right)$ زاویه بین $U_{\rm D}$ (۲)، رابطه (۲)، محاسبه شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری است که روی سطح آستری محاسبه می مود. همچنین در این حالت با فرض ثابت ودن مقدار V_0 داریم: می شود. همچنین در این حالت با فرض ثابت ودن مقدار $\beta = \alpha + 2\delta$

$$V_j = \frac{V_0}{\sin\frac{\beta}{2}}\cos(\frac{\alpha}{2}) \tag{(7)}$$

۲-۲- مدل نفوذ هیدرودینامیکی

برای محاسبه مقدار عمق نفوذ می توان از مدل هیدرودینامیکی استفاده نمود. در این مدل در اثر سرعت و فشار بسیار زیاد جت هنگام برخورد با هدف، که از تنش تسلیم ماده هدف به مراتب بالاتر است، می توان از استحکام و لزجت هدف و جت صرفنظر نمود. با این فرضیات می توان معادله برنولی را مورداستفاده قرارداد و درنهایت به رابطه (۴) رسید [۲۳].

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \tag{(f)}$$

در رابطه (r)، L در رابطه (r) چگالی ماده جت و ρ_t



شکل ۲. سطوح تعریفشده در مدل اَر-اچ-تی [۲3]

Fig. 2. RHT model surfaces [26]

هدف است. همچنین مدل توسعهیافته آن به شکل رابطه (۵) ارائه شده که در این رابطه L عددی بین ۱ تا ۲ در نظر گرفته می شود.

$$P = L \sqrt{l \frac{\rho_j}{\rho_t}} \tag{(a)}$$

اگر جت به شکل پیوسته نفوذ کند مقدار L ، ۱ و اگر کاملاً ازهم گسیخته شدهباشد مقدار آن ۲ خواهد بود. در حالتهای بینابینی هم از مقادیر بین ۱ تا ۲ استفاده می شود.

۲– ۳– مدل بتن آر–اچ–تی

مدل آر \neg ج \neg تی [۲۴]، مدل پلاستیسیته پیشرفته ای است که به وسیله ی ریدل' توسعه داده شده است [۲۵]. این مدل برای شبیه سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته اند بسیار کارآمد است. این مدل شامل سه سطح وابسته به فشار است، که عبارتند از: سطح حد الاستیک y_{el} ، سطح گسیختگی y_{fail} و سطح مقاومت پسماند معادله سطح گسیختگی در مدل آر \neg چ \neg تی با رابطه ی (۶) تعریف می شود:

$$y_{fail} = y_{TXC}(p)R_3(\theta)F_{rate}(\varepsilon)$$
(8)

1 . Riedel

که در آن y_{TXC} یک تابع مورد استفاده برای بیان فشار هیدرو استاتیکی و وابسته به نصفالنهار فشاری است. F_{rate} تابعی از نرخ کرنش و نمایانگر ضریب افزایش دینامیکی است. $(\theta)_{R_3}$ نیز سومین ثابت مقطع انحرافی است. طبق شکل ۲ با افزایش بارگذاری بر روی بتن، تا زمانی که این مقدار از تنش تسلیم اولیه کمتر باشد، کرنش الاستیک و به شکل خطی خواهد بود. با گذر از تنش تسلیم، کرنش پلاستیک آغاز میشود. در این بخش نیز با وجود رفتارهای غیرخطی بتن، با استفاده از یک خط با شیب کمتر از بخش الاستیک، رفتار بتن پیش بینی میشود. سرانجام با رسیدن مقدار تنش به سطح شکست، مقدار آن تا سطح تنش باقیمانده، کاهش مییابد. این در حالی است که مقدار کرنش همچنان در حال افزایش است

۲- ۴- سرعت قطع نفوذ

سرعت قطع نفوذ، سرعت جت در لحظهای است که دیگر قابلیت نفوذ در هدف را از دست داده است. محاسبه سرعت قطع نفوذ برای صحتسنجی محاسبه با حل گرهای عددی اهمیت بسزایی دارد. زیرا با استفاده از سرعت قطع نفوذ می توان میزان نهایی عمق نفوذ را اندازه گیری کرد.

هریسون [۲۸] عمق نفوذ را بر اساس رابطهی (۷)، وابسته به سرعت قطع نفوذ به دست آوردهاست. سرعت قطع نفوذ در خرج گود به متغیرهایی مثل چگالی آستری و هدف، فاصله قرار، عمق نفوذ و یکپارچگی جت در طول نفوذ بستگی دارد. در این رابطه، جت در تمام فرآیند نفوذ پیوسته در نظر گرفتهشدهاست:



شکل ۳. ابعاد خرج گود شبیهسازی شده [۲۰]

Fig. 3. Dimensions of shaped charge[20]

$$P_{\max} = Z_0 [(\frac{V_{j0}}{V_{\min}})^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} - 1]$$
 (Y)

در این رابطه P مقدار نهایی عمق نفوذ ، Z_0 فاصله قرار بعلاوه فاصله V_{min} و آستری، $V_{j\,0}$ سرعت نوک جت در فاصله قرار و V_{min} سرعت قطع نفوذ است. همچنین γ از رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}} \tag{A}$$

اگر رابطهی (۲) بر اساس سرعت قطع نفوذ حل شود به رابطهی (۹) تبدیل میشود.

$$V_{\min} = V_{j0} \left(\frac{Z_0}{P_{\max} + Z_0} \right)^{\gamma}$$
(9)

۳- شبیهسازی

فرآیند شبیه سازی نفوذ خرج گود در بتن در این پژوهش، در دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس اتوداین انجام شده که از نرمافزارهای متداول حوزه شکل گیری با نرخ کرنش بالا محسوب می شوند.

با توجه به وجود تقارن محوری در هندسه ی خرج گود و هدف، مسئله به صورت دوبعدی با تقارن محوری مدل شده تا در حجم محاسبات و زمان اجرای مدل کاهش قابل توجهی صورت پذیرد. همچنین برای شبیه سازی ماده منفجره، استری و هوا از المانهای اً ال ای استفاده شده است. مزیت استفاده از المان اً ال ای نسبت به المانهای اویلری، تغییر شکل یافتن المان ها است که باعث کاهش جابجایی ماده و زمان حل مسئله می شود [۲۹]. المان های هدف بتنی نیز به صورت لاگرانژی تعریف شده اند که در بخش ۲-۳ نحوه برهم کنش المان های لاگرانژی و اً ال ای در شبیه سازی انجام شده، بیشتر توضیح داده شده است.

۳– ۱– هندسه مدل

هندسه به کاررفته در این پژوهش، مشابه هندسه پژوهش وانگ و همکاران [۲۰] است. زیرا از نتایج تجربی بدستآمده در این پژوهش برای صحتسنجی شبیهسازی استفاده شدهاست. شکل ۳ ابعاد خرج گود شبیهسازی شده را نشان می دهد.

قطر خرج گود برابر با ۶۰ میلیمتر و فاصله قرار نیز دو برابر قطر ماده منفجره یعنی ۱۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شدهاست. زاویه رأس مخروط (α) برابر ۶۰ درجه است. اهداف بتنی نیز شش لایه با ضخامت ۱۰۰ میلیمتر هستند که در فاصلهی ۵۰ میلیمتری از هم قرارگرفتهاند.

مدلسازی در نرمافزار انسیس اتوداین، شامل دو قسمت تشکیل جت و فرآیند نفوذ بودهاست؛ یعنی در هر یک از آنها ابتدا مدلسازی و اجرای حل عددی برای تشکیل جت انجامشده و سپس نتایج، در بخش مدلسازی نفوذ نگاشت شدهاست. یکی از موارد مهم در اجرای حل عددی، مدتزمان لازم برای اجرای حل است. در جهت کاهش آن بعد از اینکه جت تشکیل شد، همه مواد جز مواد آستری حذف میشود. معیار مناسب برای حذف بهموقع مواد، زمانی است که آستری، انرژی لازم را از ماده منفجره کسب کردهباشد احرای این با قراردادن تعدادی اندازهگیر متحرک روی آستری و بررسی نمودار سرعت برحسب زمان، به محض اینکه سرعت اندازه گیرها ثابت شد، میتوان مواد پوسته، ماده منفجره و نگهدارنده ماده منفجره را حذف کرد. شکل ۴ مدل ایجادشده برای تشکیل جت و شکل ۵ مدل ایجادشده برای نفوذ در بتن در نرمافزار انسیس اتوداین را نشان میدهد.

در ال اس داینا بر خلاف انسیس اتوداین، نیازی به تفکیک مراحل شبیه سازی نبوده و فرآیند تشکیل جت و نفوذ در هدف، در یک مدل انجام





شکل ۵. مدل ایجادشده برای نفوذ در بتن در نرمافزار انسیس اتوداین

Fig. 5. Ansys Autodyn penetration model





شکل ۶. مدل اَستری و ماده منفجره ایجادشده در نرمافزار ال اس داینا Fig. 6. Ls-Dyna jet model

می شوند. هم چنین قابلیت حذف مواد آستری در ال اس داینا بعد از تشکیل کامل جت وجود ندارد. شکل ۶ مدل آستری و شکل ۷ مدل اهداف بتنی گسسته ایجادشده در نرمافزار ال اس داینا را نشان می دهد.

۳– ۲– مدل مواد

در آزمایشهای انجامشده توسط وانگ و همکاران، جنس آستری از مس، ماده منفجره از ترکیب بی و هدف از بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال بودهاست [۲۰]. در الاسداینا، برای آستری مسی مدل مقاومتی جانسون-کوک به همراه معادله حالت شوک، برای ماده منفجره ترکیب بی، مدل سوزش مواد پر انرژی⁽ و معادله حالت جی-دابلیو-ال^۲، برای هدف

بتنی از مدل آر –اچ−تی و برای هوا نیز از مدل و کیوم^۳ استفاده شدهاست. در انسیس اتوداین نیز شرایط مشابه ال اس داینا در نظر گرفته شده با این تفاوت که مدل مقاومتی آستری مسی، استینبرگ–گینان است. این انتخاب با توجه به کتابخانه انسیس اتوداین بوده و نتایج آن تطابق مناسبی با مدل جانسون–کوک در نرمافزار ال اس داینا دارد. جدول ۱ مدل مقاومتی و معادله حالت درنظر گرفته شده برای اجزاء مختلف خرج گود در دو نرمافزار را نشان می دهد. ضرایب پارامترهای مدل مقاومتی و معادله حالت هر یک از مواد در جدول ۲ تا جدول ۳ در پیوست آورده شده است.

۳- ۳- برهم کنش المانهای لاگرانژی و اویلری
 در ال اس داینا برای ایجاد برهم کنش بین المانهای لاگرانژی و اویلری

¹ high explosive burn

² JWL



Fig. 7. Ls-Dyna target model

جدول ۱. مدل مقاومتی و معادله حالت درنظر گرفته شده برای اجزاء مختلف خرج گود در دو نرمافزار

لقاومت	مدل م	حالت	معادله	.1 .	
انسيس اتوداين	ال اس داینا	انسيس اتوداين	ال اس داینا	جنس ماده	جزء
استينبرگ-گينان	جانسون-کوک	شوک	شوک	مس	آستری
جانسون-کوک	جانسون-کوک	شوک	شوک	فولاد	پوسته
ندارد	سوزش مواد پر انرژی	جي-دابليو-ال	جي-دابليو-ال	ترکیب بی	ماده منفجره
آر-چ-تى	آر⊣چ-تى	P-α	P-α	بتن	هدف

Table 1. Shaped charge parts strength model and eqation of states

حجمی برای فعال شدن این دستور ۲/ ۰ و ضریب فنریت تعریف شده بین المان های لاگرانژی و اویلری نیز برابر ۲/ ۰ است. همچنین برای جلوگیری از بهوجودآمدن نشتی بین المان های لاگرانژی و اویلری دستور آی–ال–ای–آ– کی^ه فعال شده و مقدار پی–ال–ای–آ–کی²نیز برابر ۲/ ۰ قرارداده شده است. در انسیس اتوداین نیز برای هماهنگسازی و تبادل اطلاعات در نقاط مرزی از مدل کوپلینگ خودکار فعال استفاده شده است. همچنین لازم است

6 PLEAK

از دستور کانستریند_لگرنج_این_سالید^۱ استفاده شدهاست. پارامترهای این دستور، تأثیر قابل توجهی بر فرآیند نفوذ خرج گود دارند. در این دستور مقدار پارامتر سیتایپ^۲ برابر ۵ قراردادهشدهاست تا امکان ایجاد حذف المانها در هدف وجود داشته باشد. پارامترهای اف-آر-سی-ام-آی-ان^۳ و پی-اف-آ-سی^{*} نیز برابر ۲/ ۰ قرار دادهشدهاست. بدین معنا که کمترین مقدار تداخل

1 Constrained_Lagrange_in_Solid

⁵ ILEAK

² CTYPE

³ FRCMIN

⁴ PFAC

جدول ۲. مقایسه نتایج شبیهسازی عددی با شبکهبندیهای متفاوت

	عمق نفوذ (mm)	2	شعاع دهانه (mm)					
خروجی لایه ۲	خروجی لایه ۱	ورودي لايه ۱	خروجی لایه ۲	ورودی لایه ۲	خروجی لایه ۱	میانی لایه ۱	ورودی لایه ۱	متغير
۴۸	۶.	۳۵	١٣۵	۳۵	۲۱۵	۵۵	۱۸۰	مقدار آزمایشگاهی
۳۵	٣٩	٣۴	147	۴.	١٨٢	44	147	شبیهسازی عددی با شبکهبندی بزرگتر
۵۵	۴.	٣٠	140	118	۲۲.	٧٠	۱۵۵	شبیهسازی عددی با شبیهسازی کوچکتر

Table 2. Effect of mesh size on results



(الف)



شکل ۸. کیفیت تخریب اهداف در دو شبکهبندی بزرگ (الف) و کوچک (ب)ا Fig. 6. Target destruction in two mesh sizes

> برای شبیه سازی نفوذ در بتن، دستور جلوگیری از فرسایش سلول های تحلیل رفته نعال شود تا از اعوجاج المان ها جلوگیری شود.

۳- ۴- شبکهبندی و همگرایی نتایج

با توجه به طولانی بودن مدتزمان حل در انسیس اتوداین، بررسی تاثیر اندازه شبکه بندی بر روی نتایج و مدت زمان حل در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور دو اندازه مختلف برای شبکه بندی در نظر گرفته شد که در در شبکه بندی بزرگتر اندازه طول سلول ها در راستای حرکت جت mm ۱ و

1 prevent erosion of degenerate cells

در شبکهبندی کوچکتر این مقدار برابر ۵ mm / در نظر گرفته شده است. همچنین قطر اهداف بتنی استوانه ای ۲۲۰ mm در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با شبکه بندی های متفاوت را نشان می دهد.

کیفیت تخریب اهداف در دو شبکهبندی مختلف در شکل ۸ مقایسه شدهاست. با توجه به نزدیک بودن نتایج شبیه سازی در شبکههای بزرگ تر و کوچک تر و ضمناً کاهش بسیار زیاد مدتزمان حل، از حدود ۴۰ روز به ۸ ساعت، شبیه سازی خرج گود با شبکهبندی بزرگ تر انتخاب شد. بر خلاف انسیس اتوداین که در آن زمان حل قابل توجه می باشد، در ال اس داینا زمان



شکل ۹. چیدمان آزمون تجربی [۲۰] Fig. 9. Setup of the test [20]

حل بسیار پایین تر بوده و در عوض فرآیند شبکه بندی بسیار زمانبر است. لذا در ال اس داینا سایز شبکهبندی کوچکتر ۵/۰ میلی متر انتخاب شد که در مسائل مشابه حل شده توسط نویسندگان نیز نتایج قابل قبولی بدست آمدهبود.

۴- نتایج و بحث

در پژوهشهای قبلی توسط نگارندگان این مقاله [۱۷–۱۹]، صحتسنجی نفوذ خرج گود در اهداف فولادی در نرمافزار انسیس اتوداین انجام شدهاست. با این حال، فرآیند نفوذ برای شرایط این پژوهش علاوه بر ال اس داینا، برای نرمافزار انسیس اتوداین نیز تکرار شدهاست. در ادامه ابتدا فرآیند صحتسنجی انجامشده برای هر دو نرمافزار توضیح داده شده و پس از آن بین نتایج بدست آمده در دو نرمافزار مقایسه صورت خواهد گرفت.

به منظور صحتسنجی شبیهسازیهای انجامشده در دو نرمافزار اللسداینا و انسیس اتوداین از نتایج تجربی پژوهش وانگ و همکاران [۲۰] استفاده شدهاست. شکل ۹ چیدمان آزمون تجربی وانگ و شکل ۱۰ دهانه نفوذ در هدف اول را نشان میدهد. نتایج بدستآمده برای سرعت نوک جت در لحظه رسیدن به هدف، قطر دهانه و عمق نفوذ استخراج شده و در جدول ۳ مقایسه شدهاست. برای محاسبه عمق نفوذ، شبیهسازی در لحظه رسیدن جت به سرعت قطع نفوذ متوقف شدهاست. سرعت قطع نفوذ مس در بتن با



شکل ۱۰. دهانه نفوذ در هدف اول [۲۰] Fig. 10. Hole crater of the first target [20]

۴– ۱– سرعت نوک جت

با بهره گیری از رابطه (۳) و تئوری پر برای محاسبه سرعت نوک جت به روش تحلیلی، سرعت ۵۴۰۰ m/s برای خرج گود مورد پژوهش بدست آمد. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، سرعت نوک جت در شبیه سازی انسیس اتوداین و ال اس داینا، بسیار نزدیک هم بوده و به مقدار بدست آمده از رابطه تحلیلی نزدیک هستند. یکی از دلایل اختلاف نتایج شبیهسازی با نتیجه تجربی، وجود خطا در اندازه گیری های تجربی است. برای مثال سرعت نوک جت برای هدف پیوسته با شرایط کاملاً مشابه ۷۱۴۰ گزارش شده که در مقایسه با نتیجه تحلیلی بدستآمده، واقعی تر به نظر می رسد. این خطا در سایر آزمونهای این پژوهش هم مشاهده می شود و می تواند مربوط به خطا در ساخت نمونه ها و یا اندازه گیری باشد. همچنین در پژوهش وانگ، مشخصات پوسته به کاررفته گزارش نشده و در شبیه سازی نیز خرج گود بدون پوسته مدلسازی شدهاست. در صورتی که نتایج شبیهسازی نشان میدهد پوسته می تواند تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه سرعت نوک جت را افزایش دهد. علاوه بر سرعت نوک جت، نتایج بدست آمده از ال اس داینا و انسیس اتوداین در توزیع سرعت در طول جت نیز تطابق مناسبی دارند که در شکل ۱۱ مشاهده می شود.

۴– ۲– عمق نفوذ

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود، عمق نفوذ بدست آمده در ال اس داینا، بیشتر از عمق نفوذ بدست آمده در انسیس اتوداین است. در واقع در هر لحظه از فر آیند نفوذ، سرعت جت ال اس داینا بیشتر از سرعت جت

(الف)	
(ب)	



شکل ۱۲ توزیع پارامتر آسیب بتن در ال اس داینا در هدف اول را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود میزان بتن تخریب شده بر اساس پارامتر آسیب، بیش از المان هایی است که بر اساس میزان کرنش پلاستیک حذف شدهاند.

در انسیس اتوداین الگوی خرابیهای بهوجودآمده با ال اس داینا متفاوت است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، در بتن ترکهای شعاعی ایجاد شده که الگوی آنها تقریباً مشابه با ترکهای موجود در توزیع آسیب در ال اس داینا در شکل ۱۲ است. اما پارامتر آسیب در انسیس اتوداین نتایج غیر قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی می دهد به طوری که بعد از نفوذ جت به هدف آخر، سه هدف اول دچار خرابی کامل شده و آسیب آنها برابر ۱ می شود. یکی از دلایل این مسئله می تواند نحوه متفاوت تعریف پارامتر آسیب در انسیس اتوداین و ال اس داینا باشد. به هر ترتیب برخلاف ال اس داینا که پارامتر آسیب بهترین نتایج را برای خرابی بتن می دهد، در انسیس اتوداین بررسی ترکهای شعاعی نتایج منطقی تری برای فروریختن بتن در قسمتهای مختلف ارائه می دهد.

علاوه بر قطر دهانه ورودی که در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفت در مرجع پارامترهای دیگری نیز اهمیت دارد که در شکل ۱۴ مشاهده می شود [۲۰]. ازجملهی این پارامترها می توان به قطر میانی و قطر دهانه خروجی اشاره کرد. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، انسیس اتوداین قطر دهانه میانی را ۱۵ میلی متر بزرگ تر از مقدار تجربی و ال اس داینا ۱۵

سه تنایج سبیهسازی و تجربی	۱. معاي	جدوں ا	۲
---------------------------	---------	--------	---

Table 3.	Comparison	of simulation	and	experimental	
results					

عمق نفوذ (mm)	قطر دهانه ورودی نفوذ (mm)	سرعت نوک جت (m/s)	پارامتر بدستآمده
۵۳۸	۱۸۰	7696	آزمایش تجربی [۲۰]
47.	184	۵۹۱۰	شبيەسازى انسيس اتوداين
7.77	۲.۹	7.71	خطاى انسيس اتوداين
۴۷۰	185	۶۱۰۸	شبيەسازى الاسداينا
۱۳٪.	<u>٪</u> ۱۰	×.۱۸	خطاى الاسداينا

انسیس اتوداین است. یکی از دلایل این مسئله میتواند به تفاوت روش حل عددی بهکاررفته در دو نرمافزار بازگردد. در انسیس اتوداین از روش تفاضل محدود استفاده میشود. در این روش معمولاً از بسط تیلور برای گسستهسازی معادلات حاکم مشتمل بر معادلات دیفرانسیل پارهای استفاده میشود. بنابراین، برای یک دامنه حل دوبعدی، شبکهای از سلولها داخل دامنه محاسباتی قرار میگیرد و تقریب تفاضلی برای نقاط داخلی اعمال میشود. ولی در روش المان محدود که در ال اس داینا مورد استفاده قرار میگیرد، تمام دامنه حل به قسمتهای کوچک محدودی تقسیم شده و معادلات حاکم با رعایت شرایط مرزی حل میگردد. از همین رو در انسیس حل میشوند که باعث زمانبرشدن حل مسئله و برهم کنش بیشتر المانها با یکدیگر میشود. به همین علت مشاهده میشود که عمق نفوذ انسیس اتوداین نسبت به ال اس داینا کمتر و قطر دهانههای بدست آمده از آن بیشتر است.

۴– ۳– قطر دهانه ورودی،میانی و خروجی نفوذ

در قطر دهانه، تفاوتهای بیشتری میان این دو نرمافزار مشاهده شد. در الاسداینا از پارامتر آسیب برای بدست آوردن قطر دهانه نفوذ استفاده شدهاست. این پارامتر که برای بررسی خرابی و ریزش بتن کاربرد دارد، علاوه بر مدل بتن آر اچ – تی، در سایر مدلهای ارائهشده برای بتن نیز دیده می شود. مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ بوده و هنگامی که مقدار پارامتر آسیب در یک نقطه به ۱ می رسد، آن نقطه دچار خرابی کامل شده و فرو می ریزد.



شکل ۱۴. پارامترهای حائز اهمیت در نفوذ شامل قطر دهانه ورودی، میانی و خروجی [۲۰]





شکل ۱۲. توزیع پارامتر آسیب بتن در ال اس داینا در هدف اول





شکل ۱۳. نفوذ و قطر دهانههای هدف اول و دوم در انسیس اتوداین Fig. 13. Penetration and crater diameter of first two targets in Ansys autodyn

جدول ۴. مقایسه قطر میانی و خروجی هدف اول Table 4. Comparison of middle and exit crater in first target

تجربی [۲۰]	انسيس اتوداين	الاسداينا	پارامتر
۵۵	٧٠	۴.	قطر دهانه میانی هدف اول (mm)
210	١٨٠	187	قطر دهانه خروجی هدف اول (mm)

میلی متر کوچکتر محاسبه نموده است. علت این امر میتواند تفاوت در برهم کنش بین المانهای لاگرانژی و اویلری در دو نرمافزار باشد. به نظر میرسد انسیس اتوداین در فرآیند نفوذ جت المانهای لاگرانژی بیشتری از هدف را با المانهای اویلری جت درگیر میکند. در قطر دهانه خروجی نیز همین مسئله مشاهده میشود و قطر دهانه خروجی انسیس اتوداین ۲۰ میلیمتر بزرگتر از الاسداینا بدستآمدهاست که البته با نتایج تجربی همخوانی بیشتری دارد.

۴- ۴- شبکهبندی و زمان اجرا

از دیگر تفاوتهای موجود بین ال اس داینا و انسیس اتوداین می توان به تفاوتهای موجود در زمان اجرا، شبکهبندی، قابلیتهای آمادهسازی مدل و مدلهای مواد در دو نرمافزار اشاره کرد. روش شبکهبندی در دو نرمافزار ال اس داینا و انسیس اتوداین یکسان نیست. در انسیس اتوداین فضای حل مسئله به صورت یکجا شبکهبندی می شود و مواد در مرزهای ایجادشده توسط هندسهی مدل قرار می گیرند اما در ال اس داینا این قابلیت وجود دارد

جدول ۵. مفایسه زمان اجرای شبیهسازی در دو نرمافزار	دو نرمافزار	شبیهسازی در	زمان اجرای	۵. مقایسه	جدول
---	-------------	-------------	------------	-----------	------

Table 5. Comparison	of model	run	time	in tw	0	
sofwares						

انسيس اتوداين	ال اس داینا	پارامتر
42.18	5.144	تعداد المانها
18	۴	زمان اجرای شبیهسازی (ساعت)

که هر قسمت، جداگانه شبکهبندی شود. به دلیل وجود تفاوت در شبکهبندی، بدستآوردن تعداد المانهای کاملاً یکسان در دو نرمافزار تقریباً غیرممکن است. با این حال برای مقایسه سعی شدهاست تعداد المانها تقریباً نزدیک به هم باشند. برای بدستآوردن یک شبکهبندی مناسب در انسیس اتوداین، میتوان فضای حل مسئله را به صورت غیریکنواخت شبکهبندی نمود تا اندازه المانها یکسان نباشد. در پژوهش انجامشده اندازه المانها در جهت شکل گیری و پیشروی جت بهتدریج کوچکتر میشوند تا دقت حل در این بخشها افزایش یافته و بزرگتربودن المانها در سایر قسمتها، به کاهش زمان حل کمک کند. در ال اس داینا نیز این مسئله در شبکهبندی هوا رعایت شده تا زمان حل کاهش یابد. تفاوت شبکهبندی در دو نرمافزار را میتوان از مقایسه شکل ۴ و شکل ۶ مشاهده نمود. جدول ۵ مقایسه زمان اجرای شبیهسازی در دو نرمافزار را نشان میدهد.

همان طور که مشاهده می شود انسیس اتوداین با تعداد المانهای کمتر، ۴ برابر بیشتر زمان برده است. این تفاوت قابل توجه در زمان اجرای شبیه سازی، به ماهیت حل گرهای این دو نرمافزار بازمی گردد. از آنجایی که انسیس اتوداین از روش تفاضل محدود استفاده می کند، زمان محاسبات آن بیشتر از روش المان محدود است که در ال اس داینا به کار می رود. در پژوهش قبلی توسط نویسندگان این مقاله نشان داده شد که کوچک تر کردن اندازه شبکه بندی در نرم افزار انسیس اتوداین می تواند دقت نتایج را افزایش دهد و تأثیر قابل توجهی نیز بر زمان حل مسئله بگذارد [۱۷].

در زمینه قابلیتهای آمادهسازی مدل نیز ال اس داینا امکانات بیشتری برای مدل کردن هندسههای مختلف و شبکهبندی آنها فراهم می کند در حالی که ایجاد هندسههای متنوع در انسیس اتوداین دشوار است. با این حال سایر مسائل مربوط به آمادهسازی مدل شامل ایجاد شرایط اولیه، شرایط مرزی و برهم کنش المانهای لاگرانژی و اویلری در انسیس اتوداین، سادگی بیشتری دارد. این سادگی در مدلهای مواد نیز برای انسیس اتوداین وجود

پيو	9	گسسته	بتن	نتايج	مقايسه	۶.	جدول	
-----	---	-------	-----	-------	--------	----	------	--

Table 6. Comparison of discrete and uniform concrete results

سته

بتن پيوسته	بتن گسسته	پارامتر		
۵۵۰	4V. 47.	الاسداينا عمق نفوذ (mm)		
ω	11.	(۱۱۱۱۱) اتوداین		

دارد به صورتی که با استفاده از کتابخانه انسیس اتوداین قابلیت استفاده از برخی از مدلهای مواد که مقادیر پارامترهای آن صحهگذاری شده وجود دارد. این در حالی است که مدلهای مواد انسیس اتوداین در مجموع بسیار کمتر از الاسداینا است که نزدیک به ۳۰۰ مدل مواد مختلف را پیشنهاد میدهد. برای مثال، برای بتن در انسیس اتوداین تنها مدلهای مواد آر–اچ– تی و دراکر پراگر موجود است. در حالی که در الاسداینا نزدیک به ده مدل مختلف برای مدلسازی بتن وجود دارد.

۴- ۵- مقایسه بتن گسسته و پیوسته

به منظور بررسی اثر گسستهسازی بتن در افزایش مقاومت هدف در برابر نفوذ، بتن پیوسته در الاسداینا شبیهسازی شده است. نتایج مقایسه شبیهسازی بتن گسسته و پیوسته در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود عمق نفوذ در بتن گسسته در الاسداینا، ۱۷ درصد و در اتوداین ۱۹ درصد کمتر از بتن پیوسته بدست آمدهاست.

برای بررسی بیشتر علت این پدیده، سرعت نوک جت در طول فرآیند نفوذ برای بتن گسسته و پیوسته اندازه گیری شده و در شکل ۱۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده میشود سرعت جت در بتن گسسته تا انتهای هدف اول با بتن پیوسته برابر است و بعد از آن هنگام نفوذ به هدف دوم کاهش قابل توجه پیدا کرده و از سرعت جت در هدف پیوسته فاصله می گیرد. این پدیده برای نفوذ از هدف دوم به سوم نیز کاملا مشهود است. یکی از دلایلی که میتواند باعث کاهش عمق نفوذ در اهداف گسسته باشد، حجم بیشتر انرژی جت است. هنگام ورود و خروج جت در هدف، تخریب قابل توجهی در هدف صورت گرفته که این تخریب نیازمند صرف انرژی جت است. برای بررسی بیشتر اثر گسستهسازی، در پژوهشهای آینده آرایشهای مختلف قرارگیری اهداف با تغییر فاصله بین آنها و پرکردن فضای خالی بین



شکل ۱۵. مقایسه سرعت نوک جت برای بتن گسسته و پیوسته



اهداف با مواد مختلف می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش، شبیهسازی فرآیند نفوذ خرج گود در بتن گسسته، در دو نرمافزار الاسداینا و انسیس اتوداین انجام گردید. نتایج بدستآمده از هر دو نرمافزار با یکدیگر مقایسه شده تا مزایا و معایب هریک از این دو نرمافزار برای شبیهسازی این مسئله و استفاده در فرآیند طراحی مشخص گردد.

استفاده از روش آ⊣ل⊣ی برای شبیهسازی فرآیند نفوذ خرج گود در بتن، در هر دو نرمافزار کارآمد بوده و موجب استفاده از مزایای هر دو روش لاگرانژی و اویلری میشود.

نتایج بدست آمده از مدل بتن آر –اچ – تی نشان از کار آمدی این مدل برای شبیه سازی رفتار بتن در بار گذاری های با نرخ کرنش بالا دارد.

سرعت نوک جت در هر دو نرمافزار بسیار نزدیک به هم و دارای تطابق نسبتاً مناسبی با تئوری تعمیمیافته پر میباشند.

پارامتر آسیب بتن در الاسداینا نتایج قابل قبولی برای فروریختن بتن و بدست آوردن قطر دهانه های ورودی، میانی و خروجی میدهد. در انسیس اتوداین ترک های شعاعی ایجادشده در بتن، الگوی مناسبی از میزان تخریب

ایجادشده میدهد.

تفاوت در روش حل عددی به کاررفته در دو نرمافزار و همچنین تفاوتهای روش برهم کنش المانهای لاگرانژی و اویلری در دو نرمافزار، باعث شد تا عمق نفوذ بدست آمده در انسیس اتوداین، از ال اس داینا کمتر و قطر دهانههای ورودی، خروجی و میانی در انسیس اتوداین نسبت به ال اس داینا بیشتر باشد. عمق نفوذ در ال اس داینا، و قطر دهانههای ورودی، خروجی و میانی در انسیس اتوداین به نتایج تجربی نزدیک تر بودند.

با توجه به قابل قبول بودن و نزدیک بودن نتایج هر دو نرمافزار، استفاده از هر دو نرمافزار برای شبیه سازی فرآیند نفوذ خرج گود امکان پذیر بوده و اختلاف زیادی بین نتایج مشاهده نمی شود. مزیت نرمافزار ال اس داینا در سرعت اجرای بیشتر و قابلیت های کنترلی بالاتر در مدل های مواد و کدهای دستوری خصوصاً نحوه برهم کنش المان های لاگرانژی و اویلری و مزیت نرمافزار انسیس اتوداین در سادگی شبیه سازی و بدست آوردن دقت قابل قبول در زمان بیشتر حل است.

مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی بتن گسسته و پیوسته، نشان دهنده کاهش عمق نفوذ در بتن بر اثر گسسته سازی است.

پيوست

جدول ۱۰. پارامترهای معادله حالت شوک برای پوسته فولادی

 Table 10. shock Equation of state parameters for steel

 case

مقدار پارامتر	نام پارامتر
4089	C (m/s)
1/49	S ₁
۲/۱۷	γ

جدول ۱۱. پارامترهای مدل جانسون کوک برای پوسته فولادی

Table 11. Jonson-Cook parameters for steel case

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۷۸۹۰	چگالی (kg/m ³)
۲۹۲	A (MPa)
۵۱۰	B (MPa)
•/7۶	n
۰/۰۱۴	с
۳ ۱/۰	М
١٧٩٣	TM (K)

منفجره	ماده	برای	دابليو-ال	جی-	حالت	معادله	مترهای	پاراه	.17	جدول
				بى	تركيب					

Table 12. JWL Equation of state parameters for
Comp-B

مقدار پارامتر	نام پارامتر
0/14ed	A (MPa)
V/FLer	B (MPa)
۴/۲	R_1
١/١	R_2
•/٣۴	ω
٨/۵٣٩	_{E0} (j/m3)

جدول ۱۳. پارامترهای مدل مقاومتی برای ماده منفجره ترکیب بی در ال اس داینا

Table 13. Strength model parameters for Comp-B

مقدار پارامتر	نام پارامتر
18	چگالی (kg/m ³)
۲۹۸۰	D (m/s)
r/90e4	P_{cj} (MPa)

Table 9. Steinberg-Guinan parameters for copper liner

in Ansys Autodyn

جدول ۹. پارامترهای مدل استینبرگ گینان برای آستری مسی در انسیس اتوداین

جدول ۷. پارامترهای معادله حالت شوک برای آستری مسی

 Table 7. shock Equation of state parameters for copper liner

جدول ۸. پارامترهای مدل جانسون کوک برای آستری مسی در ال اس داینا

Table 8. jonson- cook parameters for copper liner in Ls-Dyna

نام پارامتر

چگالی (kg/m³)

A (MPa)

B (MPa)

n

с

М

TM (K)

TR(K)

مقدار پارامتر

394.

1/49

۱/۹۹

مقدار پارامتر

۸۹۳۰ ۹۰

۲۹۲

• /۳ ۱

./. ۲۵

۱/۰۹

۱۳۵۶

٣٠٠

نام يارامتر

C (m/s)

 S_1

γ

مقدار پارامتر	نام پارامتر
f/vvev	مدول برشی [،] (kPa)
1/Tea	تنش تسليم ^۲ (kPa)
۶/۴е۵	بیشینه تنش تسلیم ^۳
۳۶	ضریب سختشوندگی ٔ
٠/۴۵	توان سختشوندگی [°]
۱/۳۵	dG/dP
-1/1964	dG/dT (kPa/K)
• / • • ٣٣	dY/dP
1/1967	دمای ذوب ^۲ (K)

¹ Shear module

² Yield Stress

³ Max. Yield Stress

⁴ Hardening const.

⁵ Hardening const.

⁶ Melting Temp

٦- فهرست علائم

علائم انگلیسی

سرعت فروپاشی ، m/s	V_{0}
--------------------	---------

- m/s، سرعت انفجار ماده منفجره U_D U_D طول جت m
 - $m N/m^2$ ، سطح حد الاستیک y_{el}
 - N/m² ، سطح گسیختگی yfail
- $m N/m^2$ ، سطح مقاومت سطح y_{fric}
 - سومين ثابت مقطع انحرافى $R_3(heta)$

علائم يونانى

- kg/m^3 چگالى، ho
- rad ، زاویه بین مماس بر آستری و محور تقارن lpha
- rad ، زاویه بین امتداد فروپاشی دیواره آستری و محور تقارن eta
 - rad ، زاويه تيلور δ
 - rad ، زاویه بین شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری $\epsilon(x)$

منابع

- [1] A. Resnyansky, G. Katselis, A. Wildegger-Gaissmaier, Experimental and numerical study of the shaped charge jet perforation against concrete target, in: Proceedings of 21st international symposium on ballistics, CD-ROM proceedings, additional entries, paper, Vol(1) 2004.
- [2] F. Hu, H. Wu, Q. Fang, J. Liu, Numerical simulations of shaped charge jet penetration into concrete-like targets, International Journal of Protective Structures, 8(2) (2017) 237-259.
- [3] Z. Tu, Y. Lu, Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations, International Journal of Impact Engineering, 36(1) (2009) 132-146.
- [4] N. Dashtin Gerami, G.H. Liaghat, G.H. Rahimi, N. Khazraiyan, Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by numerical and experimental method, Modares Mechanical Engineering, 16(10) (2016) 9-18. (in Persian)
- [5] G. Birkhoff, D.P. MacDougall, E.M. Pugh, S.G. Taylor, Explosives with lined cavities, Journal of Applied Physics, 19(6) (1948) 563-582.
- [6] H. Hatami, A. Dalvand, A.S. Chegeni, Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite

جدول ۱۴. پارامترهای معادله حالت $P-\alpha$ برای هدف بتنی

Table 14. P- α Equation of state parameters for cocrete target

مقدار پارامتر	نام پارامتر			
1/22	B ₀			
1/22	B_1			
30/TV	T_1			
•	T_2			

جدول ۱۵. پارامترهای مدل آر -اچ-تی برای هدف بتنی

Table 15. RHT model parameters for cocrete target

نر	مقدار پارامت	نام پارامتر
	2214	چگالی (kg/m ³)
	<i>۱۶</i> /۷	مدول برشی (
	۱/۶	А
	۰/۶۱	Ν
	•/•۳۵	F _c (Gpa)
	•/\٨	F_{s}^{*}
	• / ١	F_T^*
	•/۶٨	Q_0
	•/• ١•۵	В
	۳e-۹	ε_{0c}
	۳e-۹	ε_{0T}
	rerr	ε _c
	rerr	ε_T
	۰/۵۳	G_c^*
	• /Y	G_T^*
	•/۵	XI
	•/•۴	D_1
	١	D_2
	۱/۶	A_f
	۰/۶۱	N_f
	30/21	A_1
	۳٩/۵٨	A_2
	۹/۰۴	A_3

- [16] J. Brown, Modelling and Experimental Studies of a Family of Shaped Charges in an European Collaborative Forum, in: Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics, 1990, pp. 27-41.
- [17] H. Mehmannavaz, G. Liaghat, M. Nabakhteh, H. Fazeli, M. Rouhbakhsh, A. Heidari, Numerical Analysis of Reactive Shaped Charges with Bimetallic Liner into Discrete Layer Steel Target, Modares Mechanical Engineering, 20(1) (2019) 171-179. (In Persian).
- [18] H. Mehmannavaz, G. Liaghat, S. Rahmati, M. Najafi, H. Fazeli, Numerical analysis of shaped charge bimetallic liners effects on diameter and depth of penetration into steel targets, Aerospace Mechanics Journal (2019). (In Persian).
- [19] H. Mehmannavaz, G. Liaghat, S. Rahmati, M. Najafi, H. Fazeli, Theoretical, numerical and experimental analysis of bimetallic Cu–Al shaped charge's liners and its influence on the penetration depth and the crater diameter of steel targets, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(8) (2019) 336.
- [20] C. Wang, W. Xu, S.C.K. Yuen, Penetration of shaped charge into layered and spaced concrete targets, International Journal of Impact Engineering, 112 (2018) 193-206.
- [21] T. Shirai, A. Kambayashi, T. Ohno, H. Taniguchi, M. Ueda, N. Ishikawa, Experiment and numerical simulation of double-layered RC plates under impact loadings, Nuclear engineering and design, 176(3) (1997) 195-205.
- [22] P.M. Booker, J.D. Cargile, B.L. Kistler, V. La Saponara, Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts, International Journal of Impact Engineering, 36(7) (2009) 926-939.
- [23] W.P. Walters, J.A. Zukas, Fundamentals of shaped charges, John Wiley, 1989.
- [24] W. Riedel, K. Thoma, S. Hiermaier, E. Schmolinske, Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes, in: Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions

with expanded steel sheet, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(6) (2020).

- [7] H. Hatami, A. Fatholahi, The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and twocell reticular under impact loading, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50 (2017) 51-60. (in Persian)
- [8] A. Jahromi Ghodsbin, H. Hatami, Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 49(4) (2018) 685-696. (in Persian)
- [9] W. Gooch, M. Burkins, W. Walters, A. Kozhushko, A. Sinani, Target strength effect on penetration by shaped charge jets, International journal of impact engineering, 26(1-10) (2001) 243-248.
- [10] M. Held, Penetration cutoff velocities of shaped charge jets, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 13(4) (1988) 111-119.
- [11] R. DiPersio, J. Simon, A. Merendino, Penetration of shaped-charge jets into metallic targets, US Army Ballistic Research Laboratory, BRL, (1965).
- [12] N. Zlatin, A. Kozhushko, Hydrodynamic Model Concepts in the Theory of High-velocity Interaction of Solids and the Limits of their Applicability, Sov. Phys. Tech. Phys., 27(2) (1982) 212-214.
- [13] A. Kozhushko, A. Izotov, V. Lazarev, A. Balankin, Hydrodynamic model concepts in the problem of dynamic strength of materials of a different physicochemical nature. 2. Effect of tensile properties of medium, Neorganicheskie Materialy, 29(9) (1993) 1189-1209.
- [14] S.L. Hancock, An extension of the umin model for cutoff of high precision jets, International journal of impact engineering, 26(1-10) (2001) 289-298.
- [15] D. Chi, J. Conner, R. Jones, A Computational Model for the Penetration of Precision Shaped Charge Warheads, in: Proceedings of 11th International Symposium on Ballistics, 1989.

- [28] J.T. Harrison, Improved analytical shaped charge code: Basc, ARMY BALLISTIC RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD, 1981.
- [29] D.J. Benson, an efficient, accurate, simple ALE method for nonlinear finite element programs, Computer methods in applied mechanics and engineering, 72(3) (1989) 305-350.
- [30] D. Hasenberg, Consequences of coaxial jet penetration performance and shaped charge design criteria, (2010).
- [31] M.J. Murphy, Shaped-charge penetration in concrete: a unified approach, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1983.

with Structures, Berlin-Strausberg Germany, Vol. 315. 1999.

- [25] W. Riedel, Beton unter dynamischen Lasten: Meso-und makromechanische Modelle und ihre Parameter, EMI, 2000.
- [26] A. Rasouli, H. Toopchi-Nezhad, coupled vs uncoupled analysis of one-way RC-slabs under nearby air explosions, International Journal of Advanced Structural Engineering, 10(4) (2018) 421-437.
- [27] T. Borrvall, W. Riedel, The RHT concrete model in LS-DYNA, in: Proceedings of The 8th European LS-DYNA user conference, 2011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم H. Mehmannavaz, A. Ramezani, G. Liaghat, H. Fazeli, M. Rouhbakhsh, Numerical analysis of shaped charge jet penetration into discrete concrete targets using LS-DYNA and ANSYS-AUTODYN, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3953-3970.



DOI: 10.22060/mej.2020.18593.6857

بی موجعه محمد ا