



Finite Element Modeling of Multiple Solid Particles Erosion for Ti-6Al-4V Based on Johnson-Cook Plasticity and Failure Models

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khoddami A.¹ MSc,
Mohammadi B.^{*2} PhD

How to cite this article

Khoddami A, Mohammadi B. Finite Element Modeling of Multiple Solid Particles Erosion for Ti-6Al-4V Based on Johnson-Cook Plasticity and Failure Models. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):877-887.

¹Aerospace Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

²Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Hengam Street, Resalat Square, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 77491228
Fax: -
bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Article History

Received: November 13, 2018
Accepted: August 20, 2019
ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

In the present study, solid particle erosion of Ti-6Al-4V alloy under multiple particles impact was investigated using finite element modeling. The erosive behavior of this ductile alloy has been simulated as a micro-scale impact model based on Johnson-Cook plasticity and failure equations. Erosive behavior is usually described by the volumetric erosion rate, which is introduced as the eroded volume ratio of alloy surfaces to the mass of the eroding particles. In this paper, the results of the finite element model were validated by comparing with results of typical erosion models. Then, effective factors on erosive behavior of alloy, such as impacting particles velocity, particles size, particles impact angle, temperature effects, and particles shape will be investigated. Results show that there is an exponential relation between particle velocity and erosion rate. Also, as particle size increases, the erosion rate increases at first and after a specific particle size, erosion rate presents a constant trend. The maximum erosion rate has been recorded at an impact angle of 40 degrees and a temperature of 473 Kelvin (average temperature of the middle stages of the compressor). It is shown that when spherical particles shape changes to the angular shape, the erosion rate increases more than four times.

Keywords Solid Particle Erosion; Multiple Particles Impact; Johnson-Cook Plasticity Model; Finite Element Model

CITATION LINKS

[1] Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace ... [2] Failure analysis of a set of compressor ... [3] Determination of Johnson-Cook plasticity model parameters for ... [4] Finite element modeling of erosive ... [5] Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste ... [6] A study of erosion phenomena ... [7] Particle erosion of ductile metals: A mechanism of material ... [8] Solid particle erosion mechanisms of protective coating for aerospace ... [9] Finite element model of erosive wear on ductile and brittle ... [10] Solid mechanics modeling of erosion ... [11] Erosion of ductile and brittle ... [12] Erosion - corrosion mechanisms of stainless steel ... [13] Simulation model for the erosion of brittle ... [14] A Monte Carlo model for predicting the erosion rate ... [15] FE modelling of surface stresses in erosion-resistant coatings under single particle ... [16] Experimental and theoretical analysis of solid particle erosion of a steel compressor blade based on incubation time ... [17] Dynamical simulation of an abrasive wear ... [18] The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on an alumina... [19] Gas turbine handbook: principles and ... [20] Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium ... [21] Thermophysical properties of solid and liquid Ti-6Al-4V (TA6V) ... [22] Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of ... [23] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures ... [24] Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour ... [25] Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook ... [26] Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact ... [27] Wear models and predictive equations: Their form and ... [28] A study of erosion ... [29] An improved model of erosion by solid particle ... [30] A new model for the erosion of metals at normal ... [31] Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion ... [32] Particle size threshold in the erosion of ... [33] Gas turbine design, components and system design ... [34] The impact of gas turbine compressor rotor bow on aircraft ... [35] NA design-of-experiments approach to study thermal property effects ... [36] Tribology: friction and wear of engineering ... [37] Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive ...

مدلسازی المان محدود فرسایش ذره جامد چندگانه آلیاژ Ti-6Al-4V بر اساس مدل‌های پلاستیسیته و آسیب جانسون-کوک

امیرسجاد خدای MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت
ایران، تهران، ایران

بیژن محمدی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر فرسایش ذره جامد آلیاژ Ti-6Al-4V تحت برخورد ذرات چندگانه با استفاده از مدل‌سازی المان محدود بررسی شد. رفتار فرسایشی این آلیاژ نرم بر اساس معادلات پلاستیسیته و آسیب جانسون-کوک و به صورت یک مدل ضربه در مقیاس میکرو شبیه‌سازی شده است. رفتار فرسایشی مواد معمولاً با استفاده از پارامتر نرخ فرسایش حجمی توصیف می‌شود که به صورت نسبت حجم فرسایش یافته از سطح آلیاژ به جرم ذرات فرساینده تعریف می‌شود. در این مقاله ابتدا نتایج حاصل از مدل المان محدود با نتایج مدل‌های رایج در فرسایش صحت‌سنجی شد. سپس عوامل موثر بر رفتار فرسایشی آلیاژ مانند سرعت ذرات برخوردکننده، اندازه ذرات، زاویه برخورد ذرات، اثر دما و همچنین شکل ذرات مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بین سرعت ذرات و نرخ فرسایش یک رابطه توانی برقرار است. همچنین با افزایش اندازه ذرات، نرخ فرسایش ابتدا افزایش می‌یابد و پس از یک اندازه ذره مشخص، رفتار ثابتی از خود نشان می‌دهد. مطابق نتایج حداکثر نرخ فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V برای زاویه برخوردی ۴۰ درجه و دمای ۴۷۳ کلوین (دمای میانگین طبقات میانی کمپرسور) به ثبت رسیده است. نشان داده می‌شود در صورتی که شکل ذرات کروی برخوردکننده به ذرات گوشه‌دار تغییر کند نرخ فرسایش آلیاژ به بیش از چهار برابر افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فرسایش ذره جامد، برخورد ذرات چندگانه، مدل پلاستیسیته جانسون-کوک، مدل المان محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹

*نویسنده مسئول: bijan_mohammadi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

هنگامی که کمپرسورها عمل مکش هوا را انجام می‌دهند، ذرات جامد معلق در هوا با سرعت زیادی وارد توربین می‌شوند. ورود این ذرات پرسرعت به توربین ممکن است مکانیزمی از آسیب را به قطعات توربین تحمیل نماید. این مکانیزم آسیب که از آن به‌عنوان فرسایش ذره جامد (SPE; Solid Particle Erosion) یاد می‌شود، عمدتاً در بخش کمپرسور اتفاق می‌افتد^[1]. علاوه بر توربین‌های گاز صنعتی، موتورهای هوایی و خصوصاً پره‌های هلی‌کوپترها نیز در معرض برخورد مستقیم ذرات شن و ماسه معلق در جریان هوا قرار می‌گیرند. مطالعات انجام شده روی مجموعه‌ای از پره‌های وامانده از یک کمپرسور

فشاربالای توربین هوایی، برخورد ذرات شن را به‌عنوان یکی از عوامل اصلی واماندگی پره‌ها معرفی نموده است^[2]. آسیب ناشی از برخورد مواد خارجی در پره‌های کمپرسور ماهیت مکانیکی دارد. این مکانیزم آسیب می‌تواند مستقلاً موجب واماندگی شود یا دارای اثرات کاهنده بر مقاومت خستگی مواد از طریق ایجاد تمرکز تنش در نواحی برخورد، ترک‌های ایجاد شده در این نواحی، ایجاد تنش‌های باقیمانده در مکان‌های مستعد تشکیل ترک و تغییر شکل‌های پلاستیک ناشی از برخورد ذرات باشد^[3]. فرسایش ذره جامد یک مشکل جدی در توربین‌های گاز، نازل‌های موشک، دریچه‌ها، پمپ‌ها و لوله‌های دیگ‌های بخار است؛ با این حال می‌تواند در فرآیندهای تولید مانند برش جت آب ساینده، دریل کاری ساینده و خردکننده‌های ساینده کاربردهای مفیدی نیز داشته باشد^[4,5].

مطالعه سیستمیک بر فرسایش ذره جامد در نیمه دوم قرن بیستم و توسط فیینی آغاز شده است. فیینی، این نوع از آسیب را به این صورت تعریف نمود: «ذرات حمل شده توسط یک جریان سیال، سطحی را مورد برخورد قرار می‌دهند. این نوع از سایش را می‌توان به‌عنوان فرسایش توصیف کرد»^[5]. بیتر پس از فیینی «آسیب ماده در اثر برخورد ذرات حمل شده توسط یک سیستم سیال که با سرعت بالایی به سطح ماده برخورد می‌کند»^[6] را فرسایش نامید. هاشینگتر پس از آن‌ها تعریف دقیق‌تری ارائه نمود: «فرسایش، یک فرآیند سایش است که در آن برخورد مکرر ذرات کوچک حمل شده توسط یک سیال به یک سطح، موجب حذف ماده از آن سطح می‌شود»^[7]. بنابراین فرسایش ذره جامد زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات جامد حمل شده توسط یک جریان مایع یا گاز به یک ماده هدف برخورد کند و موجب تغییر شکل، شکست یا حذف کامل آن شود.

مکانیزم‌های فرسایش به دو دسته عمده فرسایش در مواد ترد و نرم تقسیم‌بندی می‌شود. حذف ماده در مواد ترد مانند سرامیک‌ها، به دلیل رشد و پیوند ترک‌های ایجاد شده در اثر برخورد ذرات به سطح اتفاق می‌افتد. در واقع انرژی ذرات برخوردکننده موجب ترک خوردگی‌های محلی در سطح هدف می‌شود که این ترک‌ها با برخوردهای بعدی رشد کرده و در نهایت با پیوند به یک‌دیگر موجب جدا شدن بخشی از ماده از سطح هدف می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بیشترین میزان فرسایش ترد، مربوط به زوایای برخوردی نزدیک به عمود باشد؛ چراکه در آن‌ها حداکثر انرژی جنبشی ذرات به سطح منتقل می‌شود. در مواد نرم مانند آلیاژهای فلزی، برخورد ذرات، کرنش‌های پلاستیک محلی در ناحیه برخورد ایجاد می‌نماید. زمانی که این کرنش‌ها از کرنش واماندگی ماده تجاوز کند، حذف ماده آغاز می‌شود. مقدار فرسایش بیشینه در مواد نرم در زوایای برخوردی پایین (۲۰ تا ۴۰ درجه) اتفاق می‌افتد^[8]. شکل ۱ به صورت شماتیک، نمونه‌ای از فرسایش ذره جامد را برای مواد نرم و ترد نشان می‌دهد.

معادلات کرنش- سختی خود، یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی به‌صورت دوبعدی ارائه نمودند. گریفین و همکاران^[18]، یک مدل دینامیکی صریح سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند تا رفتار فرسایشی مربوط به برخورد پنج ذره کروی سیلیکا به یک سطح هدف را توصیف کند. آن‌ها کاهش جرم هدف در اثر آسیب انباشته‌شده را به‌صورت تابعی از زاویه برخورد ارائه نمودند. //تتگی و همکاران^[4]، یک مدل المان محدود سه‌بعدی متقارن محوری را برای یک بستر آلیاژ Ti-6Al-4V ایجاد کرده و بر اساس مدل جانسون- کوک به بررسی اثر برخی از متغیرها بر رفتار فرسایشی ماده پرداختند. وانگ و یانگ^[9]، نیز یک مدل المان محدود سه‌بعدی ارائه نمودند که فرسایش سطح در اثر برخورد ذرات چندگانه به یک آلیاژ Ti-6Al-4V را مورد مطالعه قرار می‌دهد. آن‌ها با استفاده از معادلات جامع (Constitutive) جانسون- کوک، صد ذره کروی را با استفاده از یک روش تصادفی مدل‌سازی کردند تا به‌طور همزمان به سطح هدف برخورد نماید.

جیامپائولو^[19]، آلیاژ Ti-6Al-4V را به‌عنوان یکی از آلیاژهای مهم در پره‌های کمپرسور توربین‌های گاز معرفی نموده است. بر همین اساس در این مقاله رفتار فرسایشی آلیاژ Ti-6Al-4V به‌عنوان ماده هدف در هنگام برخورد ذرات آلومینا مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی آلیاژهای تیتانیومی به‌دلیل داشتن خواص مناسبی نظیر نسبت استحکام به وزن و مقاومت به خوردگی بالا در صنایع هوایی و حوزه‌های مشابه آن گسترش یافته‌اند^[20, 21]. ترکیب شیمیایی نوعی آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ خواص مکانیکی و حرارتی این آلیاژ را معرفی می‌نماید.

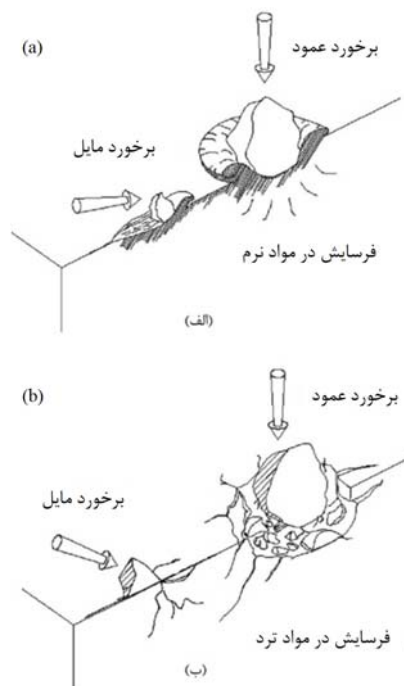
جدول ۱) ترکیب شیمیایی نوعی آلیاژ Ti-6Al-4V^[20]

عنصر	Ti	V	O	N	H	Fe	C	Al
درصد جرمی	۶	۰/۱	۰/۴	۰/۰۱۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۴/۵۳/۵	مابقی

جدول ۲) خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V^[9, 22]

پارامتر	مقدار
چگالی (kg/m ³)	۴۴۲۸
مدول الاستیک (GPa)	۱۰۹/۸
نسبت پواسون	۰/۳۱
مدول برشی (GPa)	۴۱/۹
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)	۵۵۰

به‌منظور مدل‌سازی سه‌بعدی رفتار فرسایشی ماده از روش المان محدود استفاده و تحلیل به‌صورت دینامیکی صریح توسط نرم‌افزار آباکوس (Abaqus 6.14) انجام شد. برخورد ذرات به ماده هدف به‌صورت مساله ضربه در مقیاس میکرو در نظر گرفته شد و رفتار فرسایشی ماده هدف با رفتار پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی رایج در حوزه فرسایش مقایسه و اعتبارسنجی می‌شود. سپس اثر عوامل مختلفی مانند سرعت



شکل ۱) مکانیزم‌های فرسایش ذره؛ الف) مواد نرم و ب) مواد ترد^[9]

عوامل متعددی بر میزان فرسایش ذره جامد اثرگذار است. وویتویتر و ریچمن^[10]، این عوامل را به دو دسته «اثر ذرات» شامل اندازه، شکل، چگالی و سختی ذره و «اثر جریان ذره» شامل سرعت، زاویه برخورد و نرخ شار تقسیم‌بندی کردند. آکوآرو و فونتانی^[11]، عوامل کوثر بر فرسایش را در سه دسته «متغیرهای توصیف‌کننده جریان ذرات» مانند سرعت ذره، زاویه برخورد و غلظت ذرات، «متغیرهای ذره» شامل شکل، چگالی و اندازه ذره و همچنین «متغیرهای ماده» شامل مدول یانگ، نسبت پواسون، رفتار پلاستیک و رفتار واماندگی ماده طبقه‌بندی نمودند.

راجارام^[12]، این عوامل را در چهار دسته زیر طبقه‌بندی نمود:

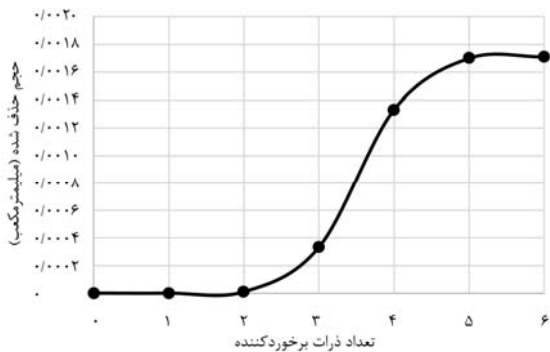
- فرسایش: سختی، اندازه، شکل، جرم و غلظت؛
 - خواص ماده: سختی، چقرمگی شکست، انعطاف‌پذیری و زبری سطح؛

- خواص سیال: ویسکوزیته، دما و چگالی؛

- شرایط جریان: سرعت سیال، زاویه برخورد و برهم‌کنش ذرات.

فرسایش ذره جامد معمولاً به‌صورت تجربی بررسی می‌شود. با این حال روش‌های تجربی را می‌توان از طریق مدل‌سازی رایانه‌ای پشتیبانی نمود. تلاش‌ها در زمینه مدل‌سازی فرسایش ذره جامد به دو روش عمده مونت‌کارلو^[13, 14] و مدل‌سازی پاسخ سطوح به برخورد ذرات (میدان تنش) انجام پذیرفته است. مدل‌های المان محدود در حوزه فرسایش با گذشت زمان تدریجاً تکامل یافته‌اند^[15]. برخی از این مدل‌ها به شبیه‌سازی برخورد تک‌ذره و برخی دیگر به شبیه‌سازی برخورد ذرات چندگانه می‌پردازند. /وستیفیو و همکاران^[16]، فرسایش ذره جامد یک پره کمپرسور را به‌صورت تجربی و نظری بررسی نمودند. //العالم و لی^[17]، نیز با فرض کرنش صفحه‌ای و با صرف‌نظر از یکی از مولفه‌های کرنش در

حذف شده ایجاد نمی‌شود. بنابراین در صورتی که مدل‌سازی برای پنج ذره برخوردکننده انجام شود، اثر برخورد ذرات بیشتر هم لحاظ خواهد شد و در نتیجه مدل‌کردن تعداد بیشتری از ذرات برخوردکننده ضروری نیست. همچنین مشاهده می‌شود که در شرایط مذکور، برخوردهای یک و دو ذره از آلومینا موجب حذف ماده از سطح هدف نمی‌شود و حذف ماده از برخورد سوم به بعد اتفاق می‌افتد.



نمودار ۱) اثر تعداد ذرات برخوردکننده بر حجم فرسایش یافته

۳- رفتار مکانیکی و مدل آسیب ماده

مدل ماده جانسون-کوک [23] یک رابطه جامع متداول برای فلزات ارائه می‌دهد و به‌طور گسترده در شبیه‌سازی مسائل مرتبط با ضربه و نفوذ مورد استفاده قرار می‌گیرد [24]. فرسایش ذرات جامد را می‌توان به‌صورت یک مساله ضربه در مقیاس میکرون مدل‌سازی و برای توصیف رفتار ماده هدف از معادلات جامع جانسون-کوک استفاده نمود.

در مدل پلاستیسیته جانسون-کوک وابستگی قانون جریان پلاستیک ($\bar{\sigma}$) به کرنش پلاستیک (ϵ^{pl})، نرخ کرنش پلاستیک معادل ($\dot{\epsilon}^{pl}$) و دمای عملکردی (T) ماده به شکل معادله (۱) بیان می‌شود.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\epsilon^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0^{pl}} \right) \right] [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

A استحکام تسلیم، B ضریب سخت‌شوندگی، n توان سخت‌شوندگی، C ثابت نرخ کرنش و m ثابت نرم‌شوندگی مدل جانسون-کوک بوده و از طریق آزمایش برای هر ماده به‌دست می‌آید. $\dot{\epsilon}_0^{pl}$ نرخ کرنش مرجع است که مقدار آن معمولاً ۱ بر ثانیه لحاظ می‌شود. همچنین T^* در رابطه (۲) تعریف شده است.

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \quad (2)$$

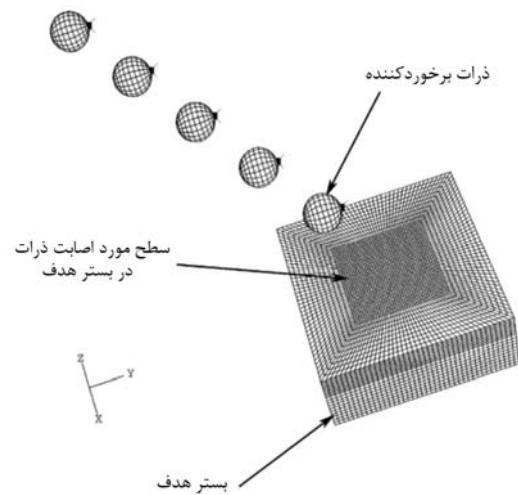
T_{ref} دمای مرجعی است که هنگام استخراج ثوابت در نظر گرفته می‌شود و T_{melt} دمای ذوب ماده را نشان می‌دهد.

مدل آسیب جانسون-کوک فرض می‌کند که هنگام ایجاد کرنش‌های پلاستیک، آسیب در المان‌های ماده انباشته می‌شود. زمانی که این آسیب انباشته‌شده به مقدار بحرانی خود می‌رسد به‌طور ناگهانی شتاب گرفته و موجب واماندگی آن المان‌ها می‌شود. مدل جانسون-کوک پارامتر آسیب (D) خود را به‌صورت معادله (۳)

برخورد ذره، اندازه ذره، زاویه برخورد ذرات به سطح هدف، شکل ذره و اثر دما بر رفتار فرسایشی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی

وقتی یک ذره جامد به سطحی برخورد می‌کند، بخش‌هایی از سطح ماده صرفاً دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود و حذف ماده از سطح به وقوع نمی‌پیوندد. این مساله موجب می‌شود که ماده دچار کرنش-سختی شود. بنابراین در مدل‌هایی که فقط برخورد تک‌ذره را مدل‌سازی کرده‌اند، این اثر مهم لحاظ نشده است. گریفین و همکاران [18]، به‌منظور بررسی این اثر برخورد پنج ذره را شبیه‌سازی نمودند و نشان دادند که در شرایط مدل‌سازی مد نظرشان از برخورد سوم به بعد، حذف ماده از سطح هدف آغاز می‌شود. شکل ۲ مدل‌سازی ذرات برخوردکننده چندگانه گریفین و همکاران را نشان می‌دهد.



شکل ۲) شبیه‌سازی ذرات برخوردکننده چندگانه [18]

در مقاله حاضر، به‌منظور در نظر گرفتن اثر برخورد ذرات چندگانه بر رفتار فرسایشی ماده هدف، شبیه‌سازی با یک تک‌ذره آغاز شده و حجم حذف‌شده از سطح محاسبه می‌شود. سپس شبیه‌سازی برای دو ذره برخوردکننده متوالی در یک محل انجام و حجم حذف‌شده کل مجدداً محاسبه می‌شود. این تکنیک برای سه، چهار و تعداد بیشتر ذرات ادامه می‌یابد تا اینکه حجم حذف‌شده کل محاسبه‌شده به مقدار پایایی برسد و افزایش تعداد ذرات برخوردکننده، تاثیر چشمگیری بر حجم حذف‌شده از سطح ماده در اثر فرسایش نداشته باشد.

برای بررسی این موضوع، مدل‌سازی برای ذرات کروی برخوردکننده از جنس آلومینا (Al_2O_3) با چگالی ۳۹۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ۱۰۰ میکرون با زاویه برخورد ۳۰ درجه و سرعت برخورد ۷۵ متر بر ثانیه در دمای محیط انجام شد. نمودار ۱ نشان می‌دهد که از ذره پنجم به بعد با افزایش تعداد ذرات تغییر زیادی در حجم

Wear of Materials) را بین سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۱ بررسی نموده و گزارش کردند که ۱۸۲ معادله برای انواع سایش وجود دارد. به‌منظور اطمینان از دقت و صحت مدلسازی المان‌محدود، نتایج حاصل از سه مدل رایج فرسایش با نتایج حاصل از کار حاضر مقایسه می‌شود. به همین منظور مطابق آنچه *التبگی* و همکاران^[۴] ارایه نموده‌اند، سه گلوله کروی فولادی با قطر ۵۰۰ میکرون و سرعت ۷۵ متر بر ثانیه به سطح یک هدف Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی بین ۱۵ تا ۷۵ درجه اصابت کرده و اعتبارسنجی در این شرایط بررسی می‌شود.

برای توصیف رفتار فرسایشی یک ماده از پارامتر نرخ فرسایش (ϵ) استفاده می‌شود. نرخ فرسایش جرمی (mg/g) به‌صورت نسبت جرم ماده حذف‌شده از سطح هدف به جرم کل ذرات برخوردکننده تعریف می‌شود. همچنین نرخ فرسایش حجمی (mm³/g) نسبت حجم ماده حذف‌شده از سطح هدف به جرم کل ذرات برخوردکننده است.

۱-۴- مدل فینی

فینی^[۵]، اولین کسی بود که یک مدل فرسایش برای تک‌ذره ارایه نمود. مفاهیم اصلی و فرضیات اساسی این مدل، راه را برای پژوهشگران بعدی هموارتر کرد. او با حل معادله حرکت برای یک ذره گوشه‌دار به جرم m که تحت زاویه α و با سرعت v به یک سطح برخورد می‌کند، مقدار حجم حذف‌شده V_f از سطح هدف را استخراج نمود. در این مدل، فینی دو سناریو برای حرکت ذره فرض نمود. در سناریوی اول که برای زوایای برخوردی پایین در نظر گرفته شد، ذره به سطح هدف برخورد کرده، سطح را جارو می‌کند و پس از کندن بخشی از سطح از آن جدا می‌شود. سناریوی دوم که برای زوایای برخوردی بالاتر ارایه شد، فرض می‌کند که ذره پس از برخورد به سطح تا حدی در آن نفوذ می‌کند و پیش از آنکه بتواند سطح را ترک کند، در آن متوقف می‌شود. سناریوهای فرضی فینی منجر به اتخاذ دو نوع شرایط مرزی متفاوت شد و در نتیجه دو معادله فرسایش (۶) و (۷) ارایه شد. مدل فینی برای مواد ترد نامناسب است؛ چراکه مفاهیم شکست و رشد ترک را در نظر نمی‌گیرد. همچنین به‌طور خاص برای زوایای برخوردی بالا یک تخمین زیر حد درست ارایه می‌کند^[۱۲]. شکل ۳ ذره‌ای را که فینی به‌وسیله آن معادلات خود را ارایه نمود، نشان می‌دهد. همچنین او معادلات خود را برای ذرات چندگانه گسترش داد.

$$V_r = \frac{mv^2}{p\psi K} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \text{ for } \tan \alpha \leq \frac{K}{6} \quad (6)$$

$$V_r = \frac{mv^2}{p\psi K} \left(\frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \text{ for } \tan \alpha \geq \frac{K}{6} \quad (7)$$

p جریان پلاستیک تنش، ψ نسبت عمق تماس به عمق برش (در شکل ۳ عمق تماس با l و عمق برش با Y_t نشان داده شده است) و K نسبت مولفه عمودی به مولفه افقی نیروی وارده به ذره است. همچنین هر دوی این معادلات یک مقدار حجم ازدست‌رفته یکسان برای $\tan \alpha = \frac{K}{6}$ پیش‌بینی می‌کنند. در نمودار ۲، مدل فینی یک تخمین بالاتر از حد حجم حذف‌شده

تعریف می‌نماید. این پارامتر بین مقدار صفر (برای ماده بکر) و یک (برای ماده کاملاً وامانده) متغیر است.

$$D = \Sigma \frac{\Delta \epsilon^{pl}}{\epsilon_f^{pl}} \quad (3)$$

شکل گام‌به‌گام (Incremental) از کرنش پلاستیک معادل است. تجمیع (Σ) روی همه گام‌های تغییر شکل انجام می‌شود. ϵ_f^{pl} کرنش پلاستیک معادل در زمان واماندگی است که در معادله (۴) معرفی شده است.

$$\epsilon_f^{pl} = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right) \right) \left(1 + D_4 \ln \left(\frac{\epsilon^{pl}}{\epsilon_0^{pl}} \right) \right) (1 + D_5 T^*) \quad (4)$$

که در آن تنش هیدرواستاتیک و D_1 تا D_5 ثوابت ماده است. با توجه به اینکه مدل ماده جانسون-کوک فقط تنش‌های انحرافی را ارایه می‌دهد، برای توصیف رفتار هر ماده جامدی باید همراه یک معادله اضافی که معادله حالت نام دارد، استفاده شود^[۲۵]. هنگامی که یک ماده نرم تحت برخورد یک فرساینده با سرعت بالا قرار می‌گیرد، معادله حالت $u_s - u_p$ برای شبیه‌سازی اثرات موج شوک مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت موج شوک (u_s) از سرعت موج الاستوپلاستیک یا سرعت ماده (u_p) بزرگ‌تر است^[۳]. این دو سرعت از طریق معادله (۵) و ثوابت C_0 و S به یکدیگر مرتبط می‌شوند. ثوابت مربوط به معادلات جامع جانسون-کوک و معادله حالت $u_s - u_p$ برای آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$u_s = C_0 + S u_p \quad (5)$$

جدول ۳) ثوابت معادلات جامع آلیاژ Ti-6Al-4V^[۹, ۲۶]

مقدار ثابت	ثابت معادله
۱۰۹۸	A (MPa)
۱۰۹۲	B (MPa)
۰/۹۳	n
۰/۰۱۴	C
۱/۱	m
۲۹۷	T_{ref} (K)
۱۸۷۸	T_{melt} (K)
-۰/۰۹	D_1
۰/۲۷	D_2
۰/۴۸	D_3
۰/۰۱۴	D_4
۳/۸۷	D_5
۵/۱۳	C_0 (km/s)
۱/۰۲۸	S

۴- اعتبارسنجی

تاکنون تلاش‌های فراوانی برای کمی‌سازی حجم حذف‌شده از ماده در طول فرآیند سایش و فرسایش انجام شده است. منگ و لومد^[۲۷] ۴۷۲۶ مقاله در مجله سایش (Wear) را بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۹۲ و ۷۴۰ مقاله در کنفرانس‌های سایش مواد (WOM;

وجود نخواهد آمد. مقدار آستانه سرعت (v_c) از طریق تئوری تماس هرتز قابل محاسبه است. بنابراین ماده حذف شده در اثر تغییر شکل پلاستیک (V_w) مطابق معادله (۸) محاسبه خواهد شد.

$$V_w = \frac{1}{2} \frac{m(v \sin \alpha - v_c)^2}{\gamma} \quad \text{for } v \sin \alpha \geq v_c \quad (8)$$

در آن γ فاکتور فرسایش تغییر شکل پلاستیک است و به صورت تجربی به دست می آید.

بیتر در فرسایش برشی، دو سناریوی معرفی شده توسط فینی و در نتیجه دو شرط مرزی مختلف را لحاظ نمود. بنابراین برای محاسبه میزان ماده حذف شده در این وضعیت (V_c) دو معادله (۹) و (۱۰) ارائه شد.

$$V_c = \frac{(2mC(v \sin \alpha - v_c)^2)}{\sqrt{v \sin \alpha} C(v \sin \alpha - v_c)^2 \rho} \quad \text{for } \alpha \leq \alpha_0 \quad (9)$$

$$V_c = \frac{m(v^2 \cos^2 \alpha - k(v \sin \alpha - v_c)^{3/2})}{2\rho} \quad \text{for } \alpha \geq \alpha_0 \quad (10)$$

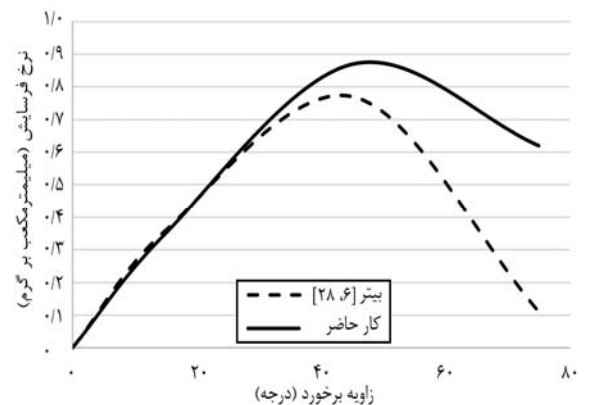
که ρ فاکتور فرسایش برشی است و به صورت تجربی به دست می آید. α_0 با استفاده از معادلات (۶) و (۴) تخمین زده می شود. همچنین C و k به ترتیب از معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می شوند.

$$C = \frac{0.288}{\sigma_y} \sqrt[4]{\frac{\rho_p}{\sigma_y}} \quad (11)$$

$$k = 0.82 \sigma_y^{2.4} \sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho_p} \left(\frac{1 - \theta_p^2}{E_p} + \frac{1 - \theta_t^2}{E_t} \right)} \quad (12)$$

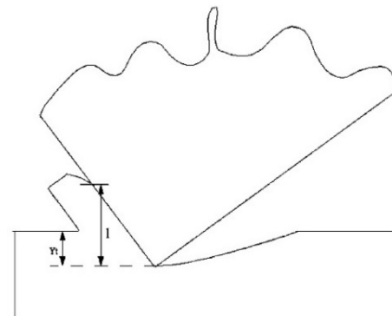
σ_y حد بار الاستیک و ρ_p چگالی ذرات است. همچنین θ_p و θ_t به ترتیب نسبت پواسون ذره و سطح هدف و E_p و E_t مدول یانگ ذره و ماده هدف هستند.

نمودار ۳، تطابق مناسبی بین نرخ فرسایش محاسبه شده از مدل بیتر و مدل المان محدود کار حاضر در زوایای برخوردی کمتر از ۳۰ درجه را نشان می دهد؛ در حالی که برای زوایای بیش از این ۳۰ درجه، مقادیر نرخ فرسایش به دست آمده از مدل بیتر کمتر از مدل المان محدود کار حاضر است.

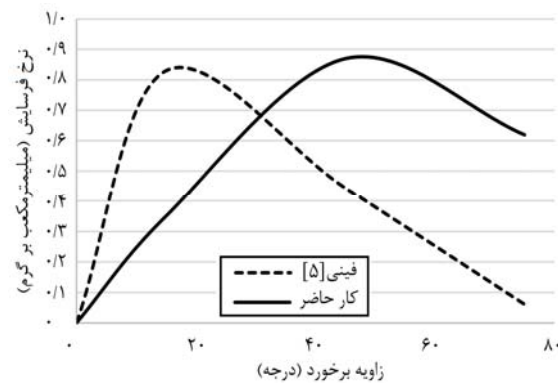


نمودار ۳) مقایسه مدل بیتر [6, 28] و کار حاضر

نسبت به مدل المان محدود کار حاضر برای زوایای برخوردی کمتر از ۳۰ درجه و یک تخمین زیر حد برای زوایای برخوردی بیش از ۳۰ درجه نشان می دهد.



شکل ۳) عمق برش و عمق تماس در مدل فینی [4]



نمودار ۲) مقایسه مدل فینی [5] و کار حاضر

۲-۴- مدل بیتر

بیتر [28, 6] حذف ماده در اثر برخورد ذرات را به دو مکانیزم نسبت داد. در طول برخورد، ممکن است ماده هدف از حد الاستیک خود فراتر برود که با از بین رفتن لایه ای از سطح، حذف ماده اتفاق می افتد. این وضعیت توسط بیتر «حذف ماده به دلیل تغییر شکل پلاستیک» نامیده شد. در حالت دوم، ذرات با برخورد به سطح سبب خراشیده شدن بخش هایی از سطح می شوند که بیتر آن را «حذف ماده به علت برش» نامید. منشأ این دسته بندی از آن جا است که سرعت ذره برخورد کننده به دو مولفه عمودی و افقی (مماسی) تجزیه می شود. مولفه عمودی عامل نفوذ ذره به داخل سطح هدف و ایجاد تغییر شکل در آن بوده و مولفه افقی عمل خراشیدن سطح را انجام می دهد. در تحلیل بیتر فرض می شود که فرسایش برشی و فرسایش تغییر شکل پلاستیک به طور همزمان اتفاق می افتد و اثر آن ها بر یک دیگر منطبق می شود. او یک تحلیل مبتنی بر تئوری تنش هرتزی انجام داد و از معادله تعادل انرژی برای استخراج روابط خود استفاده نمود.

بیتر، مفهوم آستانه سرعت را برای فرسایشی که منشأ آن تغییر شکل پلاستیک بود، ارائه کرد. او فرض کرد که اگر ذره، سرعتی کمتر از آستانه سرعت داشته باشد، ماده هدف از حد الاستیک خارج نمی شود و عملاً فرسایشی در اثر تغییر شکل پلاستیک به

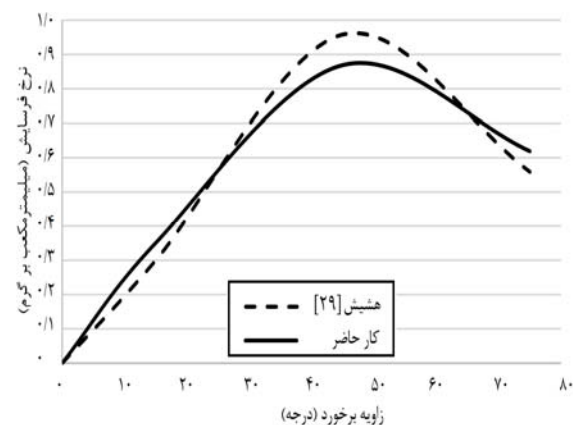
هشیش^[29]، با دنظرگرفتن مدل فینی، شروع به اصلاح فرضیات ساده‌شونده این مدل کرد و مدلی عام‌تر از مدل فینی ارایه نمود. به‌عنوان نمونه، فینی فرض کرده بود که عرض برش در یک تحلیل دوبعدی تغییر نمی‌کند که این فرض توسط هشیش اصلاح شد. همچنین، هشیش اثر شکل ذره را در مدل خود توسعه داد؛ چراکه محاسبات فینی مبتنی بر برخورد ذرات گوشه‌دار بود. هشیش یک پارامتر مشخصه سرعت تعریف کرد (معادله ۱۳) تا اختلاف بین توان سرعت مدل فینی و مشاهدات تجربی را تصحیح نماید. او در کار خود از معادله فرسایش تغییر شکل پلاستیک بیتر که شامل یک آستانه سرعت می‌شد، نیز استفاده نمود. معادله (۱۴) مدل فرسایش هشیش را نشان می‌دهد. مزیت اصلی مدل او در این است که نیازی به ثوابت تجربی ندارد.

$$C_k = \sqrt{\frac{3\sigma_s R_f^{3/2}}{\rho_p}} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{14}{\pi} \frac{\rho_t}{\rho_p} \left(\frac{v \sin \alpha - v_c}{C_k} \right)^{2.5} \cot \alpha \quad (14)$$

C_k پارامتر مشخصه سرعت، σ_s تنش تسلیم ماده، R_f فاکتور زبری ذره و ρ_t چگالی هدف است.

نمودار ۴، یک تطابق بسیار مناسب بین نرخ فرسایش حجمی محاسبه‌شده از طریق مدل المان محدود پژوهش حاضر و مدل هشیش برای تمام زوایای برخوردی ارایه می‌کند. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان به اثر شکل ذره لحاظ‌شده در مدل هشیش نسبت داد؛ چراکه بر خلاف مدل‌های قبلی، این مدل به‌طور خاص کروی بودن ذرات برخوردکننده را در محاسبات خود لحاظ می‌نماید.



نمودار ۴) مقایسه مدل هشیش^[29] و کار حاضر

۵- بحث روی نتایج

مقاله حاضر اثر پنج عامل مختلف را بر نرخ فرسایش حاصل از برخورد ذرات چندگانه آلومینا (Al2O3) به سطح آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی نموده است. مطابق آنچه در بخش ۲ مورد بحث قرار گرفت، در تمام تحلیل‌ها به‌منظور دنظرگرفتن اثر برخورد ذرات چندگانه، پنج ذره آلومینا به‌صورت متوالی به یک مکان از سطح هدف برخورد داده شدند. مدلسازی این ذرات به‌صورت جسم صلب است.

اولین عامل تحت بررسی، اثر سرعت ذرات برخوردکننده بر نرخ فرسایش است. بدین منظور ذرات آلومینا به قطر ۱۰۰ میکرون با زاویه برخوردی ۳۰ درجه و در محدوده سرعت ۶۵ تا ۸۵ متر بر ثانیه به سطح آلیاژ هدف برخورد داده شد. در مورد دوم، اثر اندازه ذرات بر نرخ فرسایش مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ذرات با قطر متغیر از ۸۰ تا ۱۲۰ میکرون و با سرعت ۷۵ متر بر ثانیه در زاویه ۳۰ درجه به سطح هدف اصابت نمودند. در سومین مورد، اثر زاویه برخورد ذرات بر نرخ فرسایش بررسی شد. در این وضعیت، ذرات به قطر ۱۰۰ میکرون و با سرعت ۷۵ متر بر ثانیه در محدوده زوایای برخوردی متغیر از ۱۵ تا ۷۵ درجه به سطح برخورد کردند. در چهارمین تحلیل، اثر دما بر نرخ فرسایش بررسی شد. بدین منظور نرخ فرسایش سطح آلیاژ Ti-6Al-4V در اثر برخورد ذرات کروی آلومینا با سرعت ۷۵ متر بر ثانیه در محدوده زوایای برخوردی ۱۵ تا ۷۵ درجه برای سه دمای ۲۹۸، ۴۷۳ و ۶۲۳ کلوین مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت اثر شکل ذره بر نرخ فرسایش به‌عنوان پنجمین اثر بررسی شد. جدول ۴ به‌طور خلاصه شرایط مورد استفاده در تحلیل موارد پنج‌گانه این مقاله را ارایه نموده است.

جدول ۴) شرایط موارد تحت بررسی

پارامتر	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳	مورد ۴	مورد ۵
سرعت ذره (m/s)	۸۵-۶۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
اندازه ذره (μm)	۱۰۰	۱۲۰-۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
زاویه برخورد (deg)	۳۰	۳۰	۷۵-۱۵	۷۵-۱۵	۷۵-۱۵
دما (K)	۲۹۸	۲۹۸	۲۹۸	۴۷۳ ۶۲۳	۲۹۸
شکل ذره	کروی	کروی	کروی	کروی	گوشه‌دار

۱-۵ اثر سرعت ذره بر نرخ فرسایش

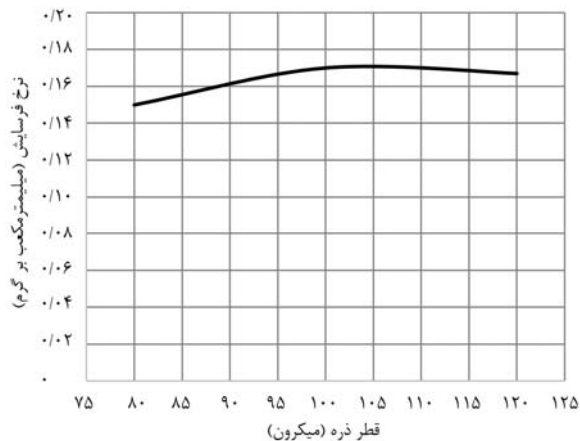
مطالعات تجربی و تحلیلی پیشین نشان می‌دهد که در مواد نرم، مطابق معادله (۱۵) یک رابطه توانی بین نرخ فرسایش و سرعت ذره وجود دارد.

$$\varepsilon \propto v^n \quad (15)$$

فینی^[5] و بیتر^[6, 28]، سرعت را به‌عنوان یک عامل کلیدی کوثر بر فرسایش در نظر گرفته و با حل معادله حرکت ذره و ارایه معادلات (۶) تا (۱۰)، توان سرعت معادله (۱۵) را ۲ پیشنهاد نمودند.

بررسی نمودارهای ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که مقدار نرخ فرسایش حجمی محاسبه‌شده توسط مدل المان محدود کار حاضر از محدوده مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های رایج فرسایش انحراف زیادی ندارد و به‌طور خاص تطابق بسیار مناسبی با مدل هشیش از خود نشان می‌دهد. بنابراین صحت نتایج به‌دست‌آمده از این مدلسازی تایید می‌شود.

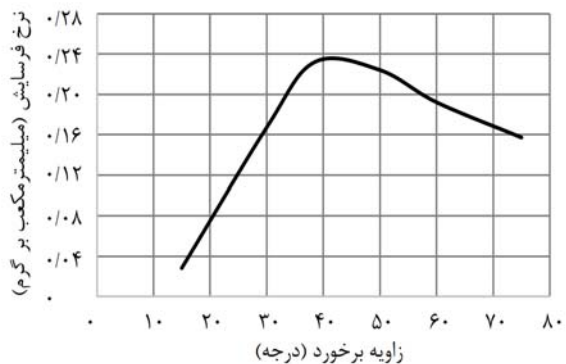
نمودار ۶، روند نسبتاً ثابتی را برای اثر اندازه ذره بر نرخ فرسایش نشان می‌دهد. برای اندازه‌های ذره بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون می‌توان به وضوح این روند ثابت را در رفتار نرخ فرسایش مشاهده نمود. بنابراین مدل المان محدود حاضر، مقدار ۱۰۰ میکرون را به‌عنوان آستانه اندازه ذره آلیاژ Ti-6Al-4V معرفی نموده و نشان می‌دهد که در اندازه‌های کمتر از ۱۰۰ میکرون با افزایش اندازه ذره، نرخ فرسایش افزایش می‌یابد.



نمودار ۶ اثر اندازه ذره بر نرخ فرسایش

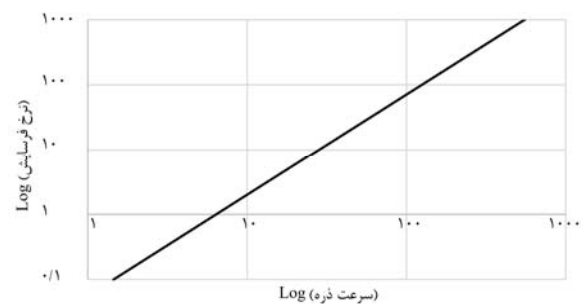
۳-۵- اثر زاویه برخورد ذره بر نرخ فرسایش

مطابق آنچه درباره فرسایش مواد نرم بیان شد، انتظار می‌رود حداکثر نرخ فرسایش برای آلیاژ Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی پایین (بین ۲۰ تا ۴۰ درجه) اتفاق بیفتد. *التبگی* و همکاران [4] حداکثر مقدار نرخ فرسایش این آلیاژ را از طریق مدل‌سازی کامپیوتری در زاویه ۴۰ درجه گزارش نمودند؛ در حالی که *بیرامردی* و *بهادر* [31] به‌طور تجربی نشان دادند که حداکثر نرخ فرسایش برای آلیاژ Ti-6Al-4V در زاویه ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد. نمودار ۷، رفتار فرسایشی سهموی را برای Ti-6Al-4V در اثر تغییر زاویه برخورد نشان می‌دهد. نرخ فرسایش از یک مقدار حداکلی در زاویه ۱۵ درجه آغاز و به حداکثر خود در حدود زاویه ۴۰ درجه می‌رسد؛ سپس با افزایش زاویه برخورد، مقدار نرخ فرسایش کاهش می‌یابد.



نمودار ۷ اثر زاویه برخورد ذره بر نرخ فرسایش

هشیش [29]، با اصلاح فرضیات ساده‌شونده آن‌ها و ارایه معادله (۱۴) این مقدار را ۲/۵ گزارش نمود. *ساندرا راجان* و *شیومن* [30] دریافتند که به‌طور کلی برای مواد نرم، توان سرعت بین ۲ تا ۳/۳ با یک مقدار میانگین ۲/۵۵ تغییر می‌کند. *بیرامردی* و *بهادر* [31] با انجام آزمایش، مقدار ۲/۳۵ را برای آلیاژ Ti-6Al-4V به‌صورت تجربی و *التبگی* و همکاران [4] مقدار ۲/۲۵۲۵ را برای این آلیاژ با استفاده از مدل‌سازی المان محدود گزارش کردند. در نمودار ۵ رابطه بین نرخ فرسایش و اندازه سرعت در یک مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. این شکل مقدار ۲/۵۰۰ را برای آلیاژ Ti-6Al-4V نشان می‌دهد. با مقایسه این مقدار و مقادیری که پیش از این برای آلیاژ مذکور گزارش شده، از این طریق نیز صحت مدل‌سازی تایید می‌شود.



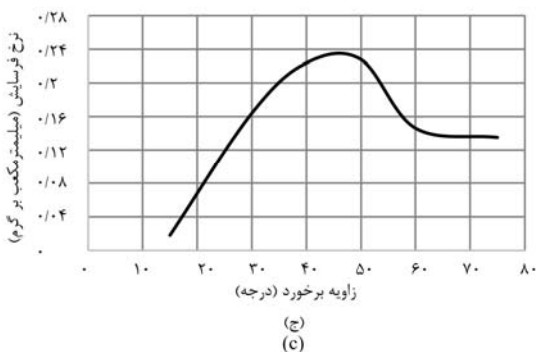
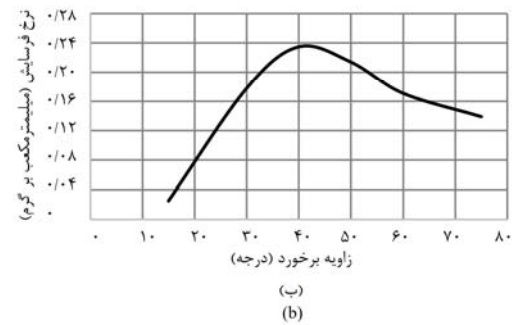
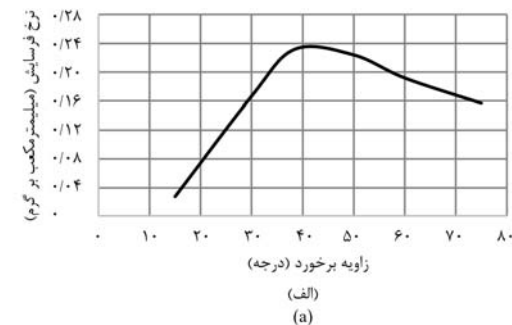
نمودار ۵ اثر سرعت ذره بر نرخ فرسایش

۲-۵- اثر اندازه ذره بر نرخ فرسایش

با افزایش اندازه ذره، جرم ذره افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نرخ فرسایش به‌صورت نسبت مقدار ماده حذف‌شده از سطح هدف به جرم کل ذرات برخوردکننده تعریف می‌شود، افزایش جرم ذره فرساینده سبب کاهش نرخ فرسایش می‌شود. از طرف دیگر افزایش اندازه ذره موجب افزایش انرژی جنبشی آن می‌شود. این افزایش انرژی به معنای افزایش حجم حذف‌شده از سطح ماده هدف است. بنابراین با افزایش اندازه جرم، دو عامل انرژی جنبشی و جرم ذره که دارای اثرات معکوس یکدیگر بر نرخ فرسایش هستند، به‌طور همزمان رشد می‌نمایند. در نتیجه نرخ رشد هر کدام از این دو عامل متضاد، تعیین‌کننده رفتار نهایی نرخ فرسایش خواهد بود. *شیومن* [32]، در تحقیق خود اذعان داشت که با کاهش اندازه ذره، نرخ فرسایش کاهش می‌یابد. *بیرامردی* و *بهادر* [31] برای آلیاژ Ti-6Al-4V به‌طور تجربی نشان دادند که در اندازه‌های ذره کمتر از ۱۰۰ میکرون، نرخ فرسایش با افزایش اندازه ذره افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که نرخ فرسایش برای اندازه‌های ذره بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون تغییر چشمگیری ندارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که اندازه ذرات از یک حد مشخصی به بعد، اثر قابل ملاحظه‌ای بر روند تغییر نرخ فرسایش نداشته باشد. این مقدار مشخص را می‌توان آستانه اندازه ذره نامید که در اندازه‌های ذره بزرگ‌تر از آن، هر چه اندازه ذره افزایش یابد نرخ فرسایش ثابت باقی می‌ماند.

ویژه ماده هدف، این افزایش دما در محل برخورد کمتر شده و در نتیجه نرم‌شوندگی محلی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب هدایت حرارتی ماده هدف، حرارت تولیدشده در محل برخورد سریع‌تر به سایر نقاط ماده منتقل می‌شود. بنابراین می‌توان به‌طور کلی اظهار داشت که با افزایش دما و متعاقب آن تغییر در برخی خواص ماده هدف، فرسایش سطح نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برخی از این تغییرات به‌صورت عامل افزایشدهنده و برخی دیگر به‌عنوان عامل کاهشدهنده، نرخ فرسایش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در نتیجه انتظار می‌رود زمانی که دما تغییر می‌کند، رقابتی بین این عوامل آغاز می‌شود تا به تبع آن مقدار نرخ فرسایش تعیین شود.

نمودار ۸، اثر دما را بر نرخ فرسایش در زوایای برخوردی بین ۱۵ تا ۷۵ درجه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما، حداکثر نرخ فرسایش به‌طور جزئی در زوایای بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین جدول ۶ نشان می‌دهد که از نظر مقداری، حداکثر نرخ فرسایش در دمای ۴۷۳ کلوین اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر طبقات میانی کمپرسور بحرانی‌ترین وضعیت فرسایشی را تجربه می‌نمایند.



نمودار ۸) اثر دما بر نرخ فرسایش؛ (الف) ۲۹۸، (ب) ۴۷۳ و (ج) ۶۲۳ کلوین

۴-۵- اثر دما بر نرخ فرسایش

کمپرسور توربین‌های گاز صنعتی و موتورهای هوایی با توجه به اندازه و نوع عملکردشان محدوده دمایی متفاوتی را تجربه می‌کنند. شبیری^[33]، برای یک کمپرسور خاص گزارش کرد که دما از ۲۸۸ کلوین در ورودی طبقات کم‌فشار تا ۵۵۰ کلوین در خروجی طبقات پرفشار تغییر می‌کند. /اسمیت و همکاران^[34] نیز برای یک موتور خاص هواپیما گزارشی منتشر کردند که دما در ورودی کمپرسور حدود ۲۵۰ کلوین و در خروجی آن حدود ۷۱۰ کلوین است. مقاله حاضر طبقات کمپرسور را به سه بخش تقسیم کرده و برای هر بخش یک دمای میانگین در نظر گرفته است:

- طبقات اولیه و بخش‌های کم‌فشار کمپرسور: دمای میانگین ۲۹۸ کلوین
- طبقات میانی و بخش‌های فشار متوسط کمپرسور: دمای میانگین ۴۷۳ کلوین
- طبقات نهایی و بخش‌های پرفشار کمپرسور: دمای میانگین ۶۲۳ کلوین

برخی خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ Ti-6Al-4V با دما تغییر می‌کنند. کارپات^[22] این خواص را به‌صورت تابعی از دما تعریف کرد. چنگ و چو^[35] نیز نمودارهایی برای توصیف برخی خواص وابسته به دمای Ti-6Al-4V ارائه نمودند. خواص وابسته به دمای Ti-6Al-4V در جدول ۵ برای سه دمای ۲۹۸، ۴۷۳ و ۶۲۳ کلوین ارائه شده است.

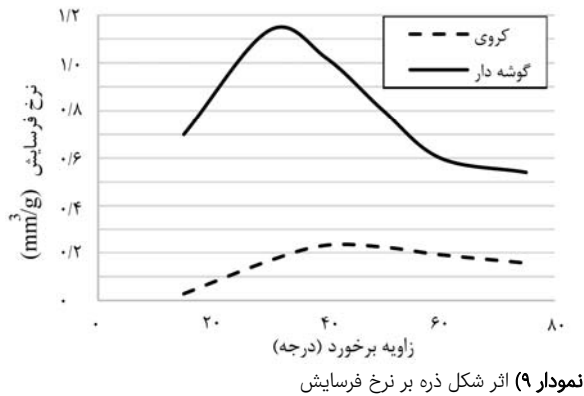
جدول ۵) خواص وابسته به دمای Ti-6Al-4V [22,35]

پارامتر	۲۹۸ کلوین	۴۷۳ کلوین	۶۲۳ کلوین
چگالی (kg/m ³)	۴۴۲۸	۴۳۹۰	۴۳۷۵
مدول یانگ (GPa)	۱۰۹/۸	۱۰۰/۱	۹۱/۵
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)	۵۵۰	۶۳۰	۶۴۰
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	۷/۰	۹/۵	۱۰/۰

افزایش دما، موجب ایجاد کرنش‌های حرارتی در مدل المان محدود می‌شود که به‌دلیل وجود قیود در مدل، یک میدان تنش جدید به وجود می‌آید. همچنین با افزایش دما، مدول یانگ کاهش می‌یابد که این کاهش مدول، ظرفیت کرنش ماده (Strain Tolerance) را بالا می‌برد. افزایش ظرفیت کرنش ماده ممکن است منجر به تاخیر در حذف ماده از سطح هدف شود. از طرف دیگر، معادلات (۱) و (۲) یک رابطه معکوس بین تنش تسلیم و دمای عملکردی در مدل پلاستیسیته جانسون- کوک ارائه می‌دهند؛ به‌طوری که تنش تسلیم جانسون- کوک با افزایش دما کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود برای شرایط عملکردی در دماهای بالاتر، تسلیم زودتر و سریع‌تر اتفاق بیفتد که این مساله یک عامل منفی در مقاومت فرسایشی ماده تلقی می‌شود. در طول تغییر شکل پلاستیک در مکان برخورد، حرارتی تولید می‌شود که یک افزایش دمای محلی در اطراف آن محل ایجاد می‌نماید و به‌صورت محلی موجب نرم‌شوندگی ماده هدف می‌شود. با افزایش ظرفیت گرمایی

طبقات	نرخ فرسایش (mm^3/g)
اولیه	۰/۲۳۲
میانی	۰/۲۳۵
نهایی	۰/۲۲۸

گوشه‌دار ۴/۹۵ برابر حداکثر نرخ فرسایش ثبت شده در اثر برخورد ذرات کروی است. همچنین حداکثر نرخ فرسایش در اثر برخورد ذرات گوشه‌دار در زاویه برخوردی ۳۲ درجه ثبت شده است؛ در حالی که این مقدار برای ذرات کروی ۴۰ درجه است.



۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل المان محدود سه بعدی برای شبیه‌سازی فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V در اثر برخورد ذرات چندگانه ارائه شد. این مدل‌سازی مبتنی بر معادلات جامع جانسون-کوک انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت ذره فرساینده با نرخ فرسایش، یک رابطه توانی دارد که مقدار توان این رابطه برای آلیاژ مورد بررسی ۲/۵۰۰۰ است. با افزایش اندازه ذره تا یک مقدار مشخص، نرخ فرسایش افزایش و پس از آن ثابت شد. همچنین نرخ فرسایش حجمی با زاویه ذره برخوردکننده یک رابطه سهموی داشت که برای شرایط مورد بررسی در زاویه برخوردی ۴۰ درجه، حداکثر مقدار خود را تجربه نمود. نتایج نشان داد که طبقات میانی کمپرسور با دمای میانگین ۴۷۳ کلوین، مستعدترین مکان برای مکانیزم آسیب فرسایش در سراسر کمپرسور هستند. بنابراین برای طراحی یک پره کمپرسور کافی است تا عمر فرسایش در شرایط عملکردی طبقات میانی محاسبه شود تا عمر سایر طبقات را نیز پوشش دهد. ذرات فرساینده گوشه‌دار خاصیت فرساینده‌گی به مراتب بیشتری نسبت به ذرات فرساینده کروی از خود نشان دادند؛ در نتیجه محاسبه عمر فرسایش یک کمپرسور باید برای شرایط ذرات فرساینده گوشه‌دار انجام پذیرد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

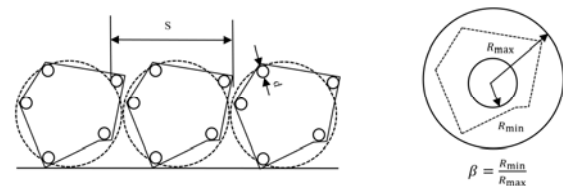
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: امیرسجاد خدای (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ بیژن محمدی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

شکل ذره یکی از پارامترهای مهم در توصیف مکانیزم فرسایش ذره جامد است. ذرات گوشه‌دار تمایل به ایجاد فرورفتگی‌های عمیق و تیز در ماده هدف دارند؛ در حالی که ذرات کروی متمایل به ایجاد فرورفتگی‌های کم عمق تر و گردتر هستند [36]. با این حال تعیین روشی برای توصیف و ایجاد گوشه‌داربودن ذرات دشوار است. استاکویاک [37]، تلاش زیادی در ارائه یک روش سیستمیک برای توصیف ذرات گوشه‌دار انجام داده است. او برای توصیف گوشه‌داربودن ذره، مرزهای ذره را به وسیله یک مجموعه مثلث مشخص نمود و نشان داد که اندازه‌های بزرگتر و تیزتر از مثلث‌ها، ذره فرساینده‌تری ایجاد می‌کند. در مقاله حاضر از روش حلقوی (Annulus Method) به منظور ایجاد ذره گوشه‌دار استفاده می‌شود. در این روش، مطابق شکل ۴، مجموعه‌ای از نقاط گوشه‌های یک ذره فرساینده درون محدوده‌ای از یک حلقه توسط R_{min} و R_{max} تعریف می‌شوند. نسبت این دو شعاع $(\beta = R_{min}/R_{max})$ ، درجه زاویه‌داربودن گوشه را نشان می‌دهد. از طرفی می‌توان گوشه‌های تیز را به وسیله ترکیب شعاع‌های گوشه‌ای که توسط دایره‌های کوچک با قطر d ایجاد می‌شوند، تقریب زد (شکل ۴). در واقع d به عنوان یک پارامتر محدودکننده برای R_{min} مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کار حاضر، برای امکان مقایسه با ذرات کروی که شعاع ۵۰ میکرون دارند، ذرات گوشه‌دار با پارامترهای $R_{max} = 50(\mu\text{m})$ ، $S = 83/4(\mu\text{m})$ ، $d = 16/7(\mu\text{m})$ و $\beta = 0/7$ مدل‌سازی شدند.



شکل ۴) توصیف گوشه‌داری ذرات

هرچه شکل ذره از وضعیت کروی به وضعیت گوشه‌دار متمایل شود، پارامتر K در معادلات (۶) و (۷) که معرف نسبت مولفه عمودی به مولفه افقی نیروی وارده به ذره است، کاهش می‌یابد. کاهش این پارامتر، مطابق معادلات مذکور، موجب افزایش میزان حجم حذف شده می‌شود. فیینی [5]، گزارش کرد که میزان فرساینده‌گی شن‌های فرساینده گوشه‌دار ۴ برابر بیشتر از شن‌های کروی است. همچنین زاویه برخوردی که حداکثر فرسایش در آن رخ می‌دهد، برای ذرات کروی بزرگتر ذرات گوشه‌دار است. نمودار ۹، نشان می‌دهد که حداکثر نرخ فرسایش متأثر از برخورد ذرات

19- Giampaolo T. Gas turbine handbook: principles and practice. 5th Edition. Lilburn:Fairmont Press; 2013.

20- Yunlian Q, Ju D, Quan H, Liying Z. Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;280(1):177-181.

21- Boivineau M, Cagran C, Doytier D, Eyraud V, Nadal MH, Wilthan B, et al. Thermophysical properties of solid and liquid Ti-6Al-4V (TA6V) alloy. *International Journal of Thermophysics*. 2006;27(2):507-529.

22- Karpát Y. Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(4):737-749.

23- Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48.

24- Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;640:200-209.

25- Jutras M. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook Model [Dissertation]. Quebec: Universite Laval; 2008.

26- Wang X, Shi J. Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;60:67-75.

27- Meng HC, Ludema KC. Wear models and predictive equations: Their form and content. *Wear*. 1995;181-183:443-457.

28- Bitter JGA. A study of erosion phenomena: Part II. *Wear*. 1963;6(3):169-190.

29- Hashish M. An improved model of erosion by solid particle impact. In: *Seventh International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*; 1987 Sep 7-10; Cambridge, England: ELSI Conference; 1987.

30- Sundararajan G, Shewmon PG. A new model for the erosion of metals at normal incidence. *Wear*. 1983;84(2):237-258.

31- Yerramareddy S, Bahadur S. Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V. *Wear*. 1991;142(2):253-263.

32- Shewmon PG. Particle size threshold in the erosion of metals. *Wear*. 1981;68(2):253-258.

33- Schobeiri MT. Gas turbine design, components and system design integration. London: Springer; 2017.

34- Smith EO, Neely AJ, Palfrey-Sneddon H. The impact of gas turbine compressor rotor bow on aircraft operations. *The Aeronautical Journal*. 2017;121(1246):1808-1832.

35- Cheng B, Chou K. A design-of-experiments approach to study thermal property effects on melt pool geometry in powder-based EBAM. In: *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*; 2013 Nov 15-21; San Diego, California, USA: American Society of Mechanical Engineers; 2013. p. V02AT02A017.

36- Hutchings IM. Tribology: friction and wear of engineering materials. UK: Edward Arnold; 1992.

37- Stachowiak GW. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. *Wear*. 2000;241(2):214-219.

1- Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha JE. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014;257:165-181.

2- Silveira E, Atxaga G, Irisarri AM. Failure analysis of a set of compressor blades. *Engineering Failure Analysis*.;15(6):666-674.

3- Farahani HK, Ketabchi M, Zangeneh Sh. Determination of Johnson-Cook plasticity model parameters for Inconel718. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017;26(11):5284-5293.

4- ElTobgy MS, Ng E, Elbestawi MA. Finite element modeling of erosive wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(11):1337-1346.

5- Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste teilchen. *Wear*. 1960;3(2):87-103.

6- Bitter JGA. A study of erosion phenomena part I. *Wear*. 1963;6(1):5-21.

7- Hutchings IM, Winter RE. Particle erosion of ductile metals: A mechanism of material removal. *Wear*. 1974;27(1):121-128.

8- Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha JE. Solid particle erosion mechanisms of protective coating for aerospace applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014;257:165-181.

9- Wang YF, Yang ZG. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*. 2008;265(5-6):871-878.

10- Woytowicz PJ, Richman RH. Solid mechanics modeling of erosion damage. In: Mc Dowell, editor. *Applications of continuum damage mechanics to fatigue and fracture*. West Conshohocken: ASTM International. pp:186-199.

11- Aquaro D, Fontani E. Erosion of ductile and brittle materials. *Meccanica*. 2001;36(6):651-661.

12- Rajahram SS. Erosion - corrosion mechanisms of stainless steel UNS S31603 [Dissertation]. Southampton: University of Southampton; 2010.

13- Verspui MA, De With G, Corbijn A, Slikkerveer PJ. Simulation model for the erosion of brittle materials. *Wear*. 1999;233-235:436-443.

14- Wellman RG, Nicholls JR. A Monte Carlo model for predicting the erosion rate of EB PVD TBCs. *Wear*. 2004;256(9-10):889-899.

15- Bielawski M, Beres W. FE modelling of surface stresses in erosion-resistant coatings under single particle impact. *Wear*. 2007;262(1-2):167-175.

16- Evstifeev A, Kazarinov N, Petrov Y, Witek L, Bednarz A. Experimental and theoretical analysis of solid particle erosion of a steel compressor blade based on incubation time concept. *Engineering Failure Analysis*. 2018;87:15-21.

17- Elalem K, Li DY. Dynamical simulation of an abrasive wear process. *Journal of Computer-Aided Materials Design*. 1999;6(2-3):185-193.

18- Griffin D, Daadbin A, Datta S. The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on an alumina scale/MA956 substrate. *Wear*. 2004;256(9-10):900-906.