



Study on Effect of Particle Velocity and Impact Angle on Erosion of Ti-6Al-4V Alloy Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khoddami A.S.¹,

Nasiri M.A.¹

Mohammadi B.^{1*}

How to cite this article

Khoddami A S, Nasiri M A, Mohammadi B. Study on Effect of Particle Velocity and Impact Angle on Erosion of Ti-6Al-4V Alloy Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(08):509-518.

¹Mechanical engineering, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran; P.O.B. 16765-163.

bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Article History

Received: March 26, 2022

Accepted: May 11, 2022

ePublished: June 17, 2022

ABSTRACT

In the present study, solid particle erosion of Ti-6Al-4V alloy under the impact of spherical alumina particles with a diameter of 85 microns was analyzed using experimental studies and smoothed particle hydrodynamics (SPH) modeling. The erosive behavior of this alloy was simulated as impacts on micro-scale and based on Johnson-Cook constitutive equations. This research focuses on the effect of particle velocity and impact angle on erosion rate as the most critical factors. Additionally, the results of this model are validated by empirical results under-considered conditions. At the end of the article, based on the alloy properties, the velocity of particles, and impact angle, a prediction equation was presented on erosion rate in the studied range of velocity and impact angle. This study indicates a power-law equation between the velocity of particles and the erosion rate, where the power is independent of impact angle. Furthermore, in all the velocity and angle ranges, the maximum erosion rate was associated with the angle of 45°. Therefore, the critical angle in erosion is also independent of the velocity of particles.

Keywords Solid Particle Erosion, Ti-6Al-4V alloy, Johnson-Cook Constitutive Model, Smoothed Particle Hydrodynamics.

CITATION LINKS

[1] Finite Element Modeling of Multiple Solid Particles Erosion ... [2] Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures [3] Micro-abrasion study of some dental restorative materials and enamel [4] Erosion-corrosion mechanisms of stainless steel ... [5] Identifying erosion mechanism... [6] Khan AS, Yu S. Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy... [7] Anisotropic response of high-purity α -titanium... [8] Finite element modeling of erosive wear [9] The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on an alumina scale/MA956 substrate [10] Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials [11] Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated ... [12] Finite element investigation of multiple solid particle erosion of Al 7075-T6 and Ti-6Al-4V alloys [13] Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [14] Numerical simulation of solid particle impacts on Al6061-T6 part I: three-dimensional representation of angular particles [15] A coupled finite element and meshfree analysis of erosive wear [16] Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials [17] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [18] Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect [19] Smoothed particle hydrodynamics [20] Perforation of metal plates: laboratory experiments and numerical simulations [21] Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets [22] Erosion of surface by solid particles [23]. A study of erosion phenomena part I [24] A study of erosion phenomena: Part II [25] Neilson JH, Gilchrist A. Erosion by a stream of solid particles [26] An improved model of erosion by solid particle impact [27] Surface engineering for corrosion and wear resistance [28] Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties ... [29] Numerical and experimental investigation of erosive wear of Ti-6Al-4V alloy [30] The sand erosion performance of coatings

مطالعه تجربی و عددی اثر سرعت ذره و زاویه برخورد بر فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V از طریق روش هیدرودینامیک ذرات هموار تاثیر

امیرسجاد خدای

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

ایران

محمدعلی نصیری

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

ایران

بیژن محمدی*

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

چکیده

در مقاله حاضر، فرسایش ذرات جامد آلیاژ Ti-6Al-4V تحت برخورد ذرات فرساینده کروی آلومینا به قطر ۸۵ میکرون، با استفاده از مطالعات تجربی و مدل سازی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی می گردد. رفتار فرسایشی این آلیاژ به صورت ضربه در مقیاس میکرو و مبتنی بر معادلات ساختاری جانسون - کوک شبیه سازی شده است. در این پژوهش، بر روی اثر سرعت ذرات فرساینده و زاویه برخوردی بر نرخ فرسایش، به عنوان مهم ترین عوامل مؤثر بر فرسایش، تمرکز شده است. هم چنین نتایج حاصل از مدل حاضر با نتایج تجربی حاصل از آزمایش در شرایط مورد نظر صحت سنجی می گردد. در انتهای مقاله، یک معادله به منظور پیش بینی نرخ فرسایش بر اساس خواص آلیاژ، سرعت ذرات فرساینده و زاویه برخورد برای بازه سرعت و زاویه تحت بررسی ارائه شده که با توجه به گستردگی بازه مورد بررسی، معادله مذکور بسیار ارزشمند می باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که بین سرعت ذرات و نرخ فرسایش یک رابطه توانی برقرار بوده که توان این رابطه مستقل از زاویه برخورد ذرات می باشد. هم چنین در تمام بازه های سرعت و زاویه تحت بررسی، زاویه برخوردی ۴۵ درجه، بیشترین میزان نرخ فرسایش را از خود نشان داد. بنابراین زاویه بحرانی در فرسایش نیز مستقل از سرعت برخورد ذرات می باشد.

کلیدواژه ها: فشار گرم، رفتار سیلانی، تبلور مجدد دینامیکی، سینوس هایپربولیک، انرژی فعال سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱

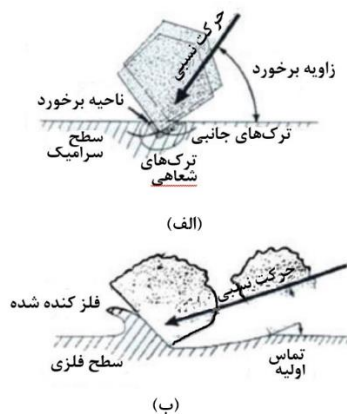
*نویسنده مسئول: bijan_mohammadi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

فرسایش ذرات جامد (Solid particle erosion) (SPE) به معنی حذف ماده از سطوح جامد به دلیل برخورد پی در پی ذرات سخت است که با سرعت های قابل توجهی درون یک سیال حرکت می کنند [1]. SPE یک عامل تخریب اصلی برای پره های کمپرسور موتورهای توربین های گاز هوایی و صنعتی است. فرسایش نه تنها کارایی توربین ها را کم می کند، بلکه عمر سرویس قطعات را نیز کاهش می دهد و در نتیجه موجب کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه عملکرد توربین خواهد شد. در محیط های کویری،

SPE شدیدتر بوده و می تواند سبب کاهش عمر چشمگیر در قطعات گردد [2].

مطابق شکل ۱، رفتار SPE را می توان به دو دسته نرم یا ترد طبقه بندی نمود. فرسایش نرم به صورت حذف ماده از طریق جریان پلاستیک مشخصه سازی می شود و معمولاً نرخ های فرسایش بیشینه را در زوایای برخوردی پایین (بین ۲۰ تا ۴۰ درجه) نشان می دهد. در مقابل، در فرسایش ترد، بیشینه حذف ماده در زاویه قائم مشخصه سازی می شود، چراکه در این حالت بیشینه انرژی جنبشی ذره به سطح منتقل می شود و از طریق شروع، رشد و اتصال ترک، حذف ماده انجام می پذیرد [3].



شکل ۱) انواع فرسایش: (الف) ترد؛ (ب) نرم.

راجارام [4] عوامل مؤثر بر فرسایش ذرات جامد را مطابق جدول ۱ به چهار دسته کلی «خواص ذرات فرساینده»، «خواص ماده هدف»، «خواص سیال حاوی ذرات فرساینده» و «شرایط جریان» تقسیم کرد. مطابق مطالعات، مهم ترین این عوامل شامل اثر زاویه و سرعت برخورد ذرات با سطح هدف می شود [5]. رفتار فرسایش یک ماده را با یکای نرخ فرسایش (E) گزارش می نمایند. این یکا به صورت نرخ فرسایش جرمی (نسبت جرم حذف شده ماده هدف به مجموع جرم ذرات برخوردی به سطح ماده با واحد (mg/g)) تعریف می گردد.

تیتانیوم به دلیل بالا بودن نسبت مقاومت به وزن، یکی از فلزاتی است که در صنایع و قطعات مختلفی از جمله پره های کمپرسور توربین های گاز، ایمپلنت های دندان و قطعات دوار مورد استفاده قرار می گیرد. آلیاژ Ti-6Al-4V بیش از ۸۰ درصد سازه های تیتانیومی را تشکیل می دهد [6-7].

جدول ۱) عوامل مؤثر بر فرسایش ذره جامد [4]

خواص فرساینده	خواص ماده هدف	خواص سیال	شرایط جریان
سختی	سختی	ویسکوزیته	سرعت سیال
اندازه	چقرمگی شکست	دما	زاویه برخورد
شکل	انعطاف پذیری	چگالی	مسیر جریان
جرم	زبری سطح		برهم کنش ذرات
غلظت	ساختار میکروسکوپی		

گسسته‌سازی می‌شود. با این حال برای کاهش زمان محاسبات، این روش‌ها معمولاً به صورت ترکیبی با روش اجزا محدود به کار می‌روند. یکی از روش‌های بدون مش شناخته‌شده، هیدرودینامیک ذرات هموار (Smoothed particle hydrodynamics) می‌باشد. هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) یک روش ذره‌ای بدون مش بر مبنای فرمول‌بندی لاگرانژی است که به صورت گسترده در زمینه‌های مختلف به کار گرفته شده است. در SPH، حالت یک سامانه با مجموعه‌ای از ذرات تعریف می‌شود که دارای خواص مادی هستند و درون بازه‌ای کنترل‌شده توسط یک تابع وزن (Weight function) یا تابع هموارکننده (Smoothing function) بر هم کنش دارند [13].

تکفلی و پاپینی [14] از روش SPH به منظور شبیه‌سازی فرسایش یک بستر هدف از جنس Al 6061-T6 با ذرات فرساینده فولادی AISI A2 استفاده کردند. مدل‌سازی آن‌ها با نرم‌افزار LS-DYNA انجام شده و مدل ساختاری لحاظ‌شده برای سطح آلومینیومی، ترکیبی از مدل کوپر - سایموند و جانسون - کوک بود. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی عددی خود را با نتایج تجربی که خود ترتیب داده بودند مقایسه و انطباق مناسبی بین آن‌ها گزارش نمودند.

وانگ و یانگ [15] نیز مدلی مبتنی بر SPH برای بررسی فرسایش پیشنهاد کردند. آن‌ها از یک بررسی دینامیک صریح سه‌بعدی استفاده کردند که از مدل جانسون - کوک برای ماده نرم Ti-6Al-4V بهره می‌گیرد. مجموع ۱۰۰۰ ذره SPH برای ناحیه برخورد استفاده شد. مدل مذکور به منظور پیش‌بینی اثر زاویه برخورد و سرعت برخورد بر روی فرسایش استفاده شد و نتایج آن به خوبی با داده‌های موجود در سایر مقالات تطابق داشت؛ اما هم‌چنان مشکل هزینه بالای حل به دلیل شبیه‌سازی تعداد زیاد ذرات وجود داشت. هادوی و پاپینی [16]، از طریق مدل‌سازی با روش SPH بر روی ذرات فرساینده SiC در اصابت با سطح هدف آلومینیومی تمرکز و اثر سرعت و زاویه برخورد بر جاساز شدن (Embedment) ذرات برخوردکننده به درون هدف را بررسی نمودند. مطابق بررسی آن‌ها با افزایش زاویه برخورد به مقدار عمود، میزان ذرات جاسازشده درون سطح هدف نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در زوایای کمتر، اغلب ذرات پس از برخورد به سطح، جدا شده و بازتاب می‌یابند. مطالعه عددی و تجربی آن‌ها بر روی تک‌ذره متمرکز بود.

پژوهش حاضر، یک مدل سه‌بعدی صریح مبتنی بر روش SPH به منظور شبیه‌سازی برخورد ذرات کرومی آلومینا به قطر ۸۰ میکرون بر سطحی از جنس Ti-6Al-4V ارائه می‌نماید. فرسایش ذرات جامد به‌مثابه یک مسئله ضربه در ابعاد میکرو در نظر گرفته شده و بر این اساس از معادلات ساختاری جانسون - کوک به منظور توصیف رفتار ماده بستر استفاده می‌گردد. تمرکز این مطالعه بر روی اثر زاویه و نیز سرعت برخورد ذرات بر روی نرخ فرسایش می‌باشد. مطالعات عددی از طریق نتایج تجربی اعتبارسنجی می‌شوند. به دلیل استفاده از روش SPH امکان شبیه‌سازی برخورد ذرات در بازه

التوبگی و همکاران [8] با الهام از شبیه‌سازی پیش‌گامانه گریفین و همکاران [9]، یک مدل اجزا محدود جهت بررسی فرسایش Ti-6Al-4V ارائه نمودند. آن‌ها یک مدل صریح سه‌بعدی چند برخوردی با سه ذره انتخاب کردند. مدل التوبگی از معادلات ساختاری ماده جانسون - کوک برای تعریف بستر تیتانیومی استفاده می‌کرد؛ در حالی که ذرات به صورت اجسام صلب تعریف شدند. آن‌ها از این مدل برای بررسی اثرات اندازه، سرعت و زاویه برخورد ذرات بر روی نرخ فرسایش استفاده کردند. روند پیش‌بینی‌شده توسط مدل مذکور تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان داد.

وانگ و یانگ [10] مدل فرسایش اجزا محدود سه‌بعدی را با استفاده از مدل‌های ساختاری جانسون - کوک برای بررسی Ti-6Al-4V توسعه دادند. در این تحقیق ۱۰۰ ذره کرومی، به صورت ۱۰ گروه شامل ۱۰ ذره با برخورد هم‌زمان به سطح، مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات آن‌ها نشان داد که مدل قادر به پیش‌بینی روندها مانند تغییر نرخ فرسایش با زاویه برخورد است، گرچه این مدل نتایج را کمی بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی نمود. در نهایت مدل مذکور به دلیل تعدد ذرات شبیه‌سازی‌شده، بسیار پرهزینه تلقی می‌شد. خدای و همکاران [11] یک مدل اجزا محدود سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی رفتار فرسایشی یک آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ توسعه دادند. آن‌ها به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، از تکنیک اجزا حجم نماینده (RVE) به عنوان جایگزین کل نمونه تحت فرسایش استفاده نمودند تا امکان شبیه‌سازی برخورد هم‌زمان چندین ذره سیلیکا وجود داشته باشد. مطالعات آن‌ها نشان می‌داد که اصابت پنج ذره کرومی پی‌درپی بر روی یک ناحیه از بستر برای لحاظ کردن اثر فرسایش ذرات چندگانه کافی بوده و بعد از برخورد ذره پنجم مقدار حجم حذف‌شده بر اثر برخوردهای بعدی پایدار می‌شود. معادلات ساختاری جانسون - کوک برای مدل‌سازی رفتار فرسایش Ti-6Al-4V توسط خدای و همکاران استفاده شد و نتایج عددی قرابت مناسبی با نتایج تجربی نشان داده و این روند را برای آلیاژ آلومینیومی [12] نیز با موفقیت تکرار نمودند؛ با این حال محدودیت‌ها و هزینه‌های روش‌های اجزا محدود در کار آن‌ها نیز مشهود بود.

یکی از محدودیت‌های مدل‌سازی اجزا محدود سه‌بعدی، میزان قابلیت تصحیح مش (Mesh refinement) است. مش‌های ریزتر پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌کنند، اما معمولاً به دلیل هزینه محاسباتی در مدل‌های صریح سه‌بعدی مناسب نیستند. مشکل دیگر روش‌های اجزا محدود، امکان اعوجاج اجزا در اثر برخورد ذرات دارای انرژی زیاد است. اگرچه می‌توان با استفاده از تکنیک‌هایی این موضوع را تا حدودی حل کرد، اما با توجه به ماهیت پرهزینه تحلیل‌های ضربه و فرسایش، مطالعات بر روی روش‌های بدون مش برای جایگزینی روش‌های المان محدود معطوف گردید. در روش‌های بدون مش متداول، ناحیه مورد نظر از طریق مجموعه‌ای از ذرات پراکنده به جای شبکه‌بندی اجزایی

عامل آسیب جانسون - کوک (D) به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود. $\Delta \epsilon^{pl}$ یک گام از کرنش پلاستیک معادل است و این جمع طی تمام تغییر شکل‌ها به صورت گام‌به‌گام (Incremental) انجام می‌شود. زمانی که D به مقدار ۱ برسد، خرابی اتفاق افتاده و حذف ماده روی می‌دهد.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^{pl}}{\epsilon_f^{pl}} \quad (4)$$

خواص مکانیکی و ثوابت معادلات (۱) تا (۵) برای آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲) خواص مکانیکی و ثوابت معادلات [18]

مقدار	ثابت
۱۰۹۸	A (MPa)
۱۰۹۲	B (MPa)
۰/۹۳	n
۰/۱۴	C
۱/۱	m
۲۹۸	Tref (K)
۱۸۷۸	Tmelt (K)
-۰/۰۹	D1
۰/۲۷	D2
۰/۴۸	D3
۰/۱۴	D4
۳/۸۷	D5

۳- مدل سازی SPH

روش SPH و معادلات مربوط به آن به‌طور کامل در مرجع [19] مورد تشریح و توضیح قرار گرفته است. زمان محاسبات یک تابع غیرخطی از تعداد ذرات SPH است [20]؛ بنابراین تعداد ذرات SPH به کار رفته در مدل باید به گونه‌ای انتخاب شود که زمان محاسبه، بدون اینکه بر روی دقت نتایج اثر قابل توجهی ایجاد کند، تا حد ممکن کاهش یابد. در پژوهش حاضر، یک مطالعه حساسیت برای بررسی وابستگی نتایج عددی به فاصله بین ذرات SPH در محدوده‌ی تحت مطالعه نشان داد که زمانی که فاصله بین ذرات از ۴۰ به ۲۰ میکرون کاهش می‌یابد، مقادیر نرخ فرسایش فقط ۴٪ تغییر می‌کنند. بنابراین یک فضای ۴۰ میکرونی بین ذرات SPH انتخاب شد. هم‌چنین بررسی تاریخچه انرژی‌های تماس لغزشی، جنبشی و درونی نشان می‌دهد که انرژی کل در حین شبیه‌سازی کامل، ثابت باقی می‌ماند و این به معنای عدم وجود ناپایداری در تحلیل است. هم‌چنین به علت اختلاف زیاد بین سختی ذرات و سطح هدف، ذرات فرساینده کروی آلومینا به قطر ۸۵ میکرون به صورت جسم صلب با چگالی 3970 kg/m^3 مدل شدند.

به منظور لحاظ کردن برخوردهای چندگانه‌ی ذرات، از روش پیشنهادی در مراجع [1,11] استفاده شد. این مرجع، برخورد ذرات را به دو وضعیت برخوردهای هم‌زمان و هم‌مکان تقسیم‌بندی و برای مدل‌سازی برخوردهای هم‌زمان از تکنیک اجزا حجم نمونه استفاده می‌نماید. بر این اساس قیود و شرایط مرزی مطرح‌شده در این مرجع به‌منظور ایجاد یک RVE مورد استفاده قرار گرفت. از

گسترده‌ای از سرعت، از 5 m/s تا 120 m/s ، فراهم شده که در مدل‌های اجزا محدود به دلیل مشکلات ناشی از اعوجاج المان‌ها مقدور نبود. از دیگر نوآوری‌های کار حاضر می‌توان به بررسی هم-زمان اثر زاویه و سرعت بر نرخ فرسایش که به صورت یک رویه سه‌بعدی ارائه شده، اشاره نمود. در نهایت با استفاده از داده‌های حاصل از این رویه سه‌بعدی، یک رابطه به منظور پیش‌بینی فرسایش ذرات جامد آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ وابسته به زاویه و سرعت برخورد ارائه خواهد شد. این معادله در شرایط تحت بررسی می‌تواند با دریافت زاویه و سرعت به عنوان ورودی، نرخ فرسایش را محاسبه نماید.

۲- معادلات ساختاری

مدل‌سازی فرسایش ذرات جامد به‌صورت یک مسئله ضربه در ابعاد میکرو و بر پایه معادلات ساختاری جانسون - کوک (J-C) [17] انجام شده است. مطابق رابطه (۱)، قانون سخت‌شوندگی J-C، جریان تنش فون مایسز ($\bar{\sigma}$) را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل ($\bar{\epsilon}^{pl}$)، نرخ کرنش پلاستیک معادل ($\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$) و دما (T) نشان می‌دهد [17]:

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

در این معادله، عبارت اول کرنش سختی است که در آن A ، B و n به ترتیب استحکام تسلیم J-C، ضریب سخت‌شوندگی و توان سخت‌شوندگی می‌باشند. عبارت دوم تغییر تنش تسلیم فون مایسز متأثر از افزایش نرخ کرنش را نشان می‌دهد که در آن C ثابت نرخ کرنش J-C و $\dot{\bar{\epsilon}}_0^{pl}$ نرخ کرنش مرجع با مقدار 1 s^{-1} است. عبارت سوم نمایانگر یک رابطه عکس بین اثرات حرارتی محلی و تنش تسلیم است. m توان نرم‌شوندگی J-C و T^* دمای همسان (Homologous temperature) است که به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود [17]:

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

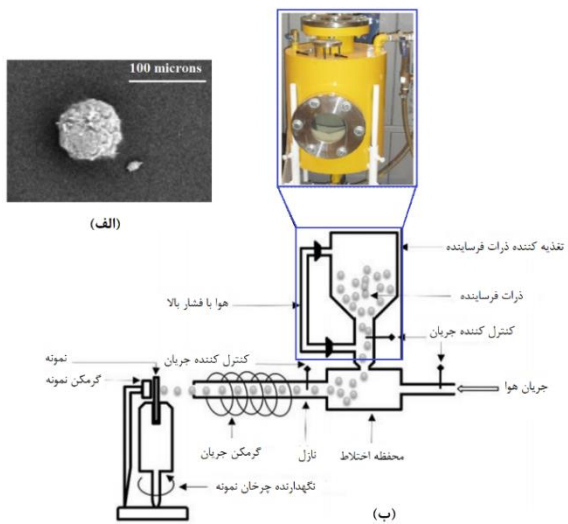
که در این عبارت T ، T_{ref} و T_{melt} به ترتیب دمای کار، دمای مرجع و دمای ذوب ماده هدف هستند.

با توجه به سرعت بالای برخوردها قطعه هدف تحت تأثیر سطوح بالای نرخ کرنش قرار می‌گیرد؛ بنابراین حساسیت نرخ کرنش به شکست نیز باید در مدل شکست لحاظ شود. با در نظر گرفتن تأثیرات دمایی بر آسیب، کرنش پلاستیک معادل در زمان واماندگی (ϵ_f^{pl}) به صورت معادله (۳) نشان داده می‌شود [17]:

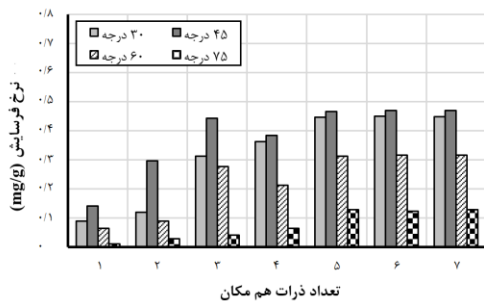
$$\epsilon_f^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}))] [1 + D_4 \ln(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0^{pl}})] [1 + D_5 T^*] \quad (3)$$

که در آن D_1 تا D_5 ثوابت مادی و σ_m تنش هیدرواستاتیکی می‌باشد.

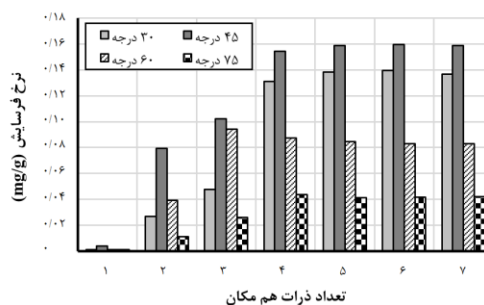
شکل ۳(الف) نمونه‌ای از یک ذره فرساینده مورد استفاده در مطالعات تجربی حاضر را نشان می‌دهد. ذرات فرساینده مذکور، استاندارد شکل‌دهی از جنس آلومینا با توزیع ۷۰ تا ۱۰۰ میکرون و میانگین نامی ۸۵ میکرون، دارای هندسه کروی می‌باشند. در دستگاه فرسایش ذره جامد، از طریق یک نازل، هوای فشرده به منظور شتاب دادن به ذرات فرساینده به سمت سطح هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه به وسیله ایجاد یک رابطه بین سرعت ذرات و جریان ذرات (فشار هوا) کالیبره می‌شود. شکل ۳(ب) به صورت طرح‌واره دستگاه آزمایش فرسایش ذرات جامد مقاله حاضر را معرفی می‌نماید.



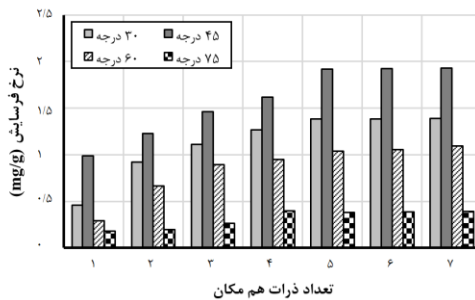
شکل ۳) بخش تجربی مطالعه (الف) نمونه‌ای از ذرات کروی فرساینده آلومینا؛ (ب) نمایشی از دستگاه آزمایش فرسایش ذرات جامد



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲) بررسی اثر تعداد ذرات هم‌مکان بر نرخ فرسایش در سرعت (الف) ۴۵ متر بر ثانیه؛ (ب) ۷۵ متر بر ثانیه؛ (ج) ۱۲۰ متر بر ثانیه

طرف دیگر، به منظور شبیه‌سازی برخوردهای چندگانه در یک محل مشخص از سطح هدف، ابتدا یک ذره به RVE برخورد کرده و نرخ فرسایش ثبت شد. سپس دو ذره متوالی به یک نقطه اصابت داده شد و نرخ فرسایش محاسبه گردید. این فرآیند برای سه، چهار و تعداد بیشتری از ذرات فرساینده تکرار شد، تا جایی که نرخ فرسایش به دست‌آمده، مستقل از تعداد برخوردهای هم‌مکان باشد. این وضعیت در بازه‌ی زاویه و سرعت تحت بررسی انجام می‌شود تا تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی به دست آید. مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود که در زوایای برخوردی غیر بحرانی مانند ۶۰ و ۷۵ درجه، مدل‌سازی ۴ ذره برای رسیدن به یک نرخ فرسایش مستقل از تعداد ذرات کافی است؛ اما برای زوایای بحرانی، یعنی ۳۰ و ۴۵ درجه، حداقل ۵ ذره هم‌مکان باید مدل‌سازی شود. این مسئله در سرعت برخورد نیز دیده می‌شود؛ به نحوی که در سرعت ۴۵ متر بر ثانیه، مدل‌سازی ۴ ذره متوالی کافی است؛ اما برای سرعت‌های بالاتر، یعنی ۷۵ و ۱۲۰ متر بر ثانیه، تعداد ۵ ذره لازم می‌باشد. در این مطالعه، به منظور بررسی در شرایط برابر، تمامی مدل‌ها با ۵ ذره مدل‌سازی شده‌اند.

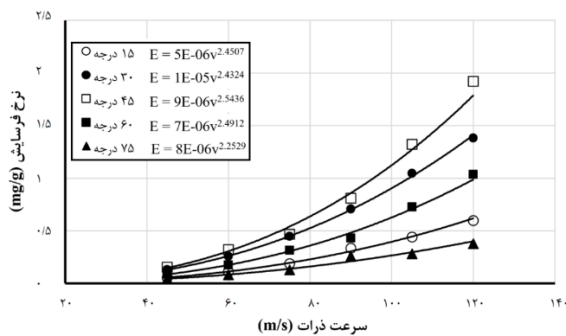
۴- مطالعه تجربی

استاندارد آزمایش ASTM G76 [21] برای فرسایش ذرات جامد با جت‌های گاز، یکی از مراجع مهم برای آزمایش‌های فرسایش شناخته می‌شود. این استاندارد، به طور فراگیر برای مشخصه‌سازی فرسایش مواد دارای ساختار پیشرفته از جمله پوشش‌ها و هم‌چنین انجام مطالعات روی همه‌ی پره‌های کمپرسور توربین‌های گاز مناسب نیست. بنابراین رویکردهای مختلفی برای سازگاری این استاندارد با شرایط مورد نظر گسترش یافته است.

جدول ۳) نرخ فرسایش (mg/g) به دست آمده از مطالعات تجربی و مدل سازی SPH برای تمامی داده های مقاله حاضر

		زاویه برخورد (درجه)										
		۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵						
سرعت برخورد (m/s)	آزمایش مدل آزمایش مدل آزمایش مدل	۴۵	۰/۰۵۵	۰/۰۶۰	۰/۱۳۱	۰/۱۲۴	۰/۱۵۴	۰/۱۴۰	۰/۰۸۸	۰/۰۹۱	۰/۰۴۴	۰/۰۳۸
	۶۰	۰/۱۱۳	۰/۱۰۹	۰/۲۵۶	۰/۲۷۰	۰/۳۲۳	۰/۳۲۲	۰/۱۷۵	۰/۱۸۷	۰/۰۸۲	۰/۰۹۵	
	۷۵	۰/۱۸۹	۰/۱۹۲	۰/۴۴۶	۰/۴۲۹	۰/۴۶۶	۰/۴۸۲	۰/۳۱۳	۰/۳۳۱	۰/۱۲۹	۰/۱۳۰	
	۹۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۰	۰/۷۰۶	۰/۷۲۱	۰/۸۰۱	۰/۷۷۵	۰/۴۲۹	۰/۴۰۶	۰/۲۵۷	۰/۲۴۸	
	۱۰۵	۰/۴۴۲	۰/۴۵۰	۱/۰۴۵	۱/۰۰۲	۱/۳۲۰	۱/۴۱۰	۰/۷۲۷	۰/۷۱۴	۰/۲۸۳	۰/۲۹۱	
	۱۲۰	۰/۵۹۷	۰/۵۷۴	۱/۳۸۳	۱/۴۱۰	۱/۹۲۱	۱/۸۳۲	۱/۰۳۶	۱/۱۴۱	۰/۳۷۹	۰/۳۸۴	

یک رابطه توانی بین نرخ فرسایش و سرعت ذرات نشان می دهد. توان سرعت ذرات در تمامی موارد، بین مقدار ۲/۲ تا ۲/۵۵ قرار گرفته است. بیشترین توان مربوط به زاویه ۴۵ درجه با مقدار توان ۲/۵۴۳۶ و کمترین آن مربوط به زاویه ۷۵ درجه با مقدار ۲/۲۵۲۹ است. بنابراین زاویه برخورد به صورت جزئی بر روی توان سرعت اثر داشته که قابل صرف نظر بوده و در نتیجه توان سرعت ذرات فرساینده، مستقل از زاویه می باشد. با توجه به این که نتایج توان سرعت را با دقت مناسبی مستقل از زاویه برخورد نشان می دهند، می توان مقدار میانگین زوایای برخوردی مختلف را به عنوان توان سرعت فرسایش برای آلیاژ Ti-6Al-4V با مقدار ۲/۴۳۴۲ برای نتایج عددی گزارش نمود. **جدول ۴** نیز همین روند را برای نتایج تجربی ارائه نموده و استقلال توان سرعت از زاویه برخورد را به خوبی نشان می دهد. همچنین مقایسه ی بین شکل ۴ و جدول ۴ اعتبار نتایج حاصل از مطالعات عددی را تأیید می نماید.



شکل ۴) اثر سرعت ذرات بر نرخ فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی مختلف

جدول ۴) توان سرعت مستخرج از نتایج تجربی نرخ فرسایش به تفکیک زوایای برخورد

زاویه ی برخورد (درجه)	توان سرعت مستخرج از نتایج تجربی	متغیر R ² از برازش منحنی
۱۵	۲/۳۶۵۸	۹۹/۸۰
۳۰	۲/۴۵۵۳	۹۹/۸۲
۴۵	۲/۶۱۱۵	۹۹/۲۳
۶۰	۲/۴۶۷۸	۹۸/۴۴
۷۵	۲/۳۳۳۷	۹۸/۱۶

آلیاژ Ti-6Al-4V به صورت نمونه هایی با ابعاد ۳۰ × ۳۰ × ۱/۵ میلی متر بریده، تمیز و در چندین مرحله صیقل داده شد تا زبری سطح آن ها کاهش یابد. نمونه ها قبل از آزمایش و پس از آزمایش تمیز شده و به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شده و اختلاف وزن آن ها پیش و پس از آزمایش به عنوان وزن ازدست رفته نمونه در اثر فرسایش ثبت گردیده تا نرخ فرسایش از طریق آن مورد محاسبه قرار گیرد.

در طراحی آزمایش این پژوهش، دو متغیر زاویه برخورد و سرعت ذرات به عنوان متغیرهای اصلی لحاظ شده و اثر سایر متغیرها تثبیت (Block) گردید. از جمله متغیرهای مزاحمی (Co-factors) که ثابت در نظر گرفته شدند، می توان به قطر نازل که برابر ۲/۵ میلی متر بود اشاره نمود. هم چنین مدت زمان آزمایش برای تمام نمونه ها ۱۵ دقیقه و با نرخ تغذیه ی ثابت ۱/۷ گرم بر دقیقه لحاظ گردید. مواردی از جمله دما و رطوبت، اندازه و جنس و شکل ذرات، زبری سطح نمونه ها، فاصله کاری نازل تا سطح هدف و مجری آزمایش در تمامی آزمایش ها به صورت ثابت کنترل شدند. به منظور افزایش دقت در آزمایش، فرآیند مذکور دو بار برای شرایط یکسان تکرار شد. هم چنین اصل تصادفی بودن در ترتیب اجرای آزمایش ها نیز رعایت گردید. در نهایت تعداد ۶۰ آزمایش مستقل طراحی شد که در جدول پیوست (۱) به طور خلاصه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که طراحی آزمایش این مقاله از روش طراحی فاکتوریل کامل چندسطحی (Multilevel full-factorial design) و به وسیله نرم افزار Minitab برنامه ریزی گردید.

۵- اعتبارسنجی و بحث و بررسی نتایج

نتایج حاصل از مطالعه تجربی مطابق جدول ۳ با نتایج عددی مقایسه شده اند. بررسی خطاهای محاسبه شده بین داده های تجربی و عددی، روند ثابت و مشخصی از خود نشان نمی دهد که بتوان بین تغییرات خطا با تغییر سرعت و یا زاویه ی برخورد ارتباط مشخصی ارائه نمود. با این حال، از این داده ها می توان دریافت که میانگین خطاهای محاسبه شده بین داده های تجربی و عددی، مقدار ۴/۷۵٪ می باشد. بیشینه ی خطا مربوط به زاویه برخوردی ۷۵ درجه و سرعت ۶۰ متر بر ثانیه با مقدار ۱۳/۶۸٪ می باشد؛ در حالی که کمترین خطا در زاویه ۴۵ درجه و سرعت ۶۰ متر بر ثانیه با مقدار ۰/۳۱٪ ثبت شده است. با توجه به این بازه از خطای مقایسه ای می توان استنتاج نمود که شبیه سازی عددی به خوبی نتایج تجربی را پشتیبانی کرده و از اعتبار کافی برخوردار است.

شکل ۴ رابطه بین سرعت ذرات فرساینده و نرخ فرسایش را به تفکیک زوایای برخوردی حاصل از حل عددی نشان می دهد. در این نمودار، اثر سرعت در بازه بین ۴۵ تا ۱۲۰ متر بر ثانیه و با گام ۱۵ در زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه تحت بررسی قرار گرفته است. مشاهدات حاکی از آن است که با افزایش سرعت، نرخ فرسایش افزایش می یابد. برازش منحنی روی داده ها، به تفکیک هر زاویه،

(Penetration) نیز موسوم است، به دلیل نفوذ عمودی ذرات و تغییر شکل پلاستیک ناشی از آن در هنگام برخورد می‌باشد. در این حالت تنش از حد الاستیک ماده فراتر رفته، آسیب در سطح آغاز شده و لایه‌ها تحت برخورد عمودی حذف می‌شود. تنش‌های عمودی در این سازوکار سهم اساسی در حذف ماده را بر عهده دارند. سازوکار دوم، یعنی برش (Cutting) در زوایای برخوردی پایین‌تر روی داده و از طریق تنش‌های برشی به ماده آسیب زده و موجب کنده شدن سطح آن می‌گردد. در زوایای بینابینی (۳۰ تا ۶۰ درجه)، هر دو سازوکار همزمان عمل می‌کنند. بنابراین انتظار می‌رود که این زوایا نسبت به زوایای بسیار پایین (۱۵ درجه) یا بسیار بالا (۷۵ درجه) نرخ فرسایش بیشتری از خود نشان دهند. به منظور بررسی این موضوع، در یک لحظه پیش از آغاز آسیب، شکل ۶ کران‌نمای (contour) تنش فون - مایسز سطح هدف برای زوایای ۱۵، ۴۵ و ۷۵ درجه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در زمان یکسان، زاویه ۴۵ درجه سطوح تنشی بالاتری را از خود نشان می‌دهد. پس از آن زاویه ۱۵ و با اندکی اختلاف، زاویه ۷۵ درجه سطح تنش کمتری را نشان می‌دهند که با نتایج شکل ۵ منطبق است.

به منظور بررسی میزان حساسیت نرخ فرسایش به تغییرات سرعت و زاویه، پارامتر MMR (Maximum erosion rate to Minimum erosion rate Ratio) به صورت نسبت بیشینه نرخ فرسایش به کمینه آن در هر سرعت برخوردی ارائه می‌شود. جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، MMR نیز افزایش می‌یابد؛ بدان معنا که در سرعت‌های بالاتر، اختلاف بیشتر بین حداقل نرخ فرسایش (در زاویه ۷۵ درجه) و حداکثر نرخ فرسایش (در زاویه ۴۵ درجه) مشاهده شده است. در حقیقت می‌توان ادعا نمود که علی‌رغم آن‌که زاویه‌ای که بیشینه و کمینه نرخ فرسایش در آن رخ می‌دهد، مستقل از سرعت ذرات است، اما مقدار نرخ فرسایش در سرعت‌های بالاتر تأثیر بیشتری از تغییرات زاویه برخوردی ذرات می‌پذیرد.

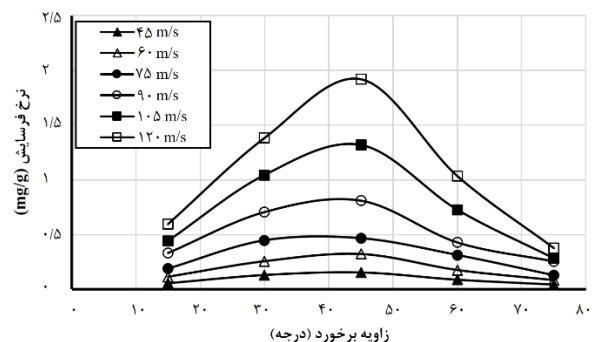
شکل ۷ نیز به نوعی حساسیت نرخ فرسایش به زاویه و سرعت را مشخص می‌نماید و مؤید نتایج حاصل از جدول ۵ می‌باشد. اهمیت این شکل در استخراج معادله‌ای به منظور پیش‌بینی نرخ فرسایش است که به صورت همزمان به سرعت و زاویه برخورد وابسته باشد.

جدول ۵) بررسی حساسیت سرعت ذرات بر مقدار نرخ فرسایش از طریق متغیر MMR

سرعت (متر بر ثانیه)	MMR
۴۵	۳/۵۲۵
۶۰	۳/۹۱۰
۷۵	۳/۶۱۶
۹۰	۳/۱۵۵
۱۰۵	۴/۶۷۰
۱۲۰	۵/۰۷۰

مطالعات تجربی و تحلیلی پیشین نیز مؤید این موضوع است که در مواد نرم، ارتباط بین نرخ فرسایش و سرعت ذره، یک ارتباط توانی ($E \propto v^n$) است. مدل‌های تحلیلی مانند مدل فینی [22]، مدل بیتر [23,24] و مدل نیلسون - گیلکریست [25] مقدار ۲ را به عنوان توان سرعت ذرات در فرسایش مواد نرم ارائه نموده‌اند. هشیش [26] با انجام اصلاحاتی بر روی مدل‌های تحلیلی، توان سرعت را ۲/۵ گزارش نمود. مطالعات بر روی فرسایش مواد نشان می‌دهد که مقدار توان سرعت برای فلزات بین ۲ تا ۲/۵ و برای سرامیک‌ها بین ۲/۵ تا ۳ تخمین زده می‌شود، گرچه برخی مشاهدات خارج از این محدوده بوده‌اند [27]. به طور خاص، در شبیه‌سازی‌های عددی، ال‌توبگی و همکاران [8]، این متغیر را با مقدار ۲/۲۵۲۵ و وانگ و یانگ [10] با مقدار ۲/۲۶۹۱ برای آلیاژ Ti-6Al-4V گزارش نموده‌اند. یراماردی و بهادر [28] و محمدی و همکاران [29] با انجام آزمایش‌های تجربی، به ترتیب توان سرعت معادل ۲/۲۱۴۵ و ۲/۲۱۴۵ را برای آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ به ثبت رساندند. بنابراین از مقایسه مقدار توان به دست آمده از مدل‌سازی حاضر با مجموعه متعددی از مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی برای آلیاژ مورد نظر، می‌توان صحت نتایج داده‌ها و توانایی مدل SPH این مقاله را در ارزیابی اثر سرعت ذرات بر فرسایش بستر Ti-6Al-4V تأیید نمود.

شکل ۵ رابطه بین زاویه برخورد ذرات با نرخ فرسایش را برای سرعت‌های مختلف، در بازه ۱۵ تا ۷۵ درجه با گام ۱۵ درجه نشان می‌دهد. بررسی این اثر در تمام سرعت‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه برخوردی، نرخ فرسایش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که فارغ از مقدار سرعت ذرات، حداکثر فرسایش در زاویه ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد. پیش از این مراجع دیگری از جمله [1,8,11] نشان داده بودند که زاویه ۴۵ درجه به عنوان زاویه بحرانی برای آلیاژ Ti-6Al-4V شناخته می‌شود. این تطابق نیز صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی SPH حاضر را تأیید می‌نماید. همچنین شکل ۵ مانند شکل ۴ تأییدی بر این موضوع است که زاویه برخورد بحرانی، مستقل از سرعت ذرات خواهد بود. مطابق نظر بیتر [23, 24] کنده شدن ذرات از سطح مواد نرم با دو سازوکار اتفاق می‌افتد. سازوکار اول که به سازوکار نفوذ



شکل ۵) اثر زاویه ذرات بر نرخ فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V در سرعت ذرات برخوردی مختلف

در فرسایش، انرژی جنبشی ذرات برخوردکننده به سطح هدف منتقل می‌شود. این انتقال انرژی علت اصلی جدایش و حذف ماده و متعاقب آن فرسایش سطح هدف می‌باشد. به تجربه اثبات شده که نرخ فرسایش (E) را می‌توان به صورت رابطه (۵) نشان داد [30]:

$$E = K^{\gamma} f(\alpha) B \quad (5)$$

که در آن K معرف انرژی جنبشی ذره، γ توان انرژی جنبشی، $f(\alpha)$ تابع وابستگی نرخ فرسایش به زاویه برخورد و B یک مقدار ثابت می‌باشد. مدل‌های فرسایش سعی می‌کنند که مقدار ثابت B را به مشخصات سطح هدف و ذرات فرساینده ارتباط دهند. با توجه به این‌که رابطه انرژی جنبشی ذرات و سرعت آن‌ها به صورت توانی از 2 ($K \propto v^2$) می‌باشد، مطابق رابطه (۶) می‌توان انتظار داشت که بین نرخ فرسایش و سرعت ذره رابطه‌ای توانی با مقدار توان نامشخص برقرار است که این رابطه در شکل ۴ نیز از طریق شبیه‌سازی نشان داده شد.

$$E \propto v^r \quad (6)$$

مطابق بررسی‌هایی که در شکل ۴ انجام شد، بر اساس شبیه‌سازی حاضر می‌توان مقدار $r = 2.4342$ را به آلیاژ Ti-6Al-4V اطلاق نمود. بنابراین رابطه (۵) به صورت رابطه (۷) بازنویسی می‌گردد:

$$E = v^{2.4342} f(\alpha) B' \quad (7)$$

به منظور استخراج رابطه مربوط به $f(\alpha)$ از طریق داده‌های موجود از شبیه‌سازی در شکل ۷، با استفاده از نرم‌افزار Matlab R2014a برازش منحنی انجام می‌شود. بر این اساس تابع مربوط به زاویه به صورت رابطه (۸) ارائه خواهد شد.

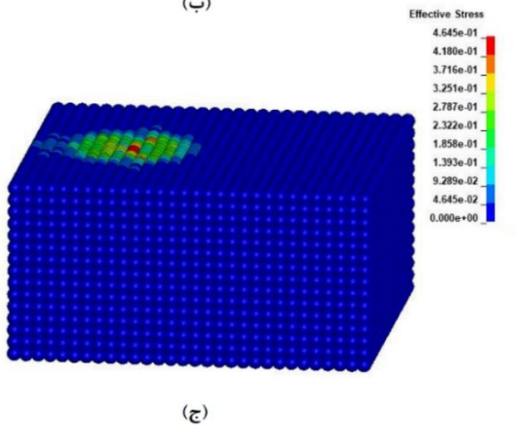
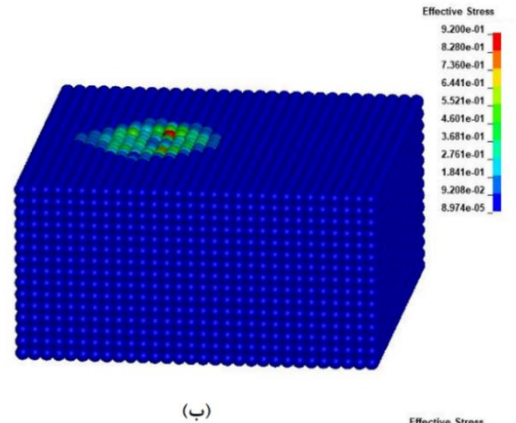
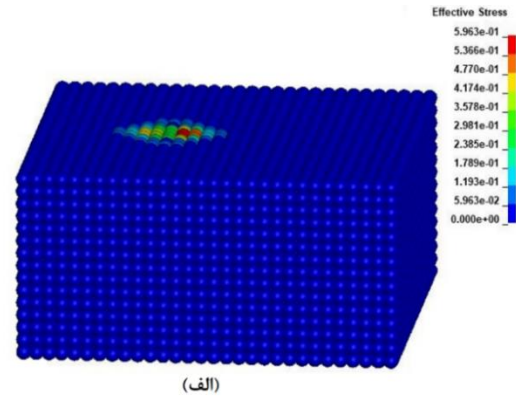
$$f(\alpha) = \sigma \sin(Q\alpha + X) + \tau \sin(Y\alpha + Z) \quad (8)$$

که در آن α زاویه برخورد ذرات بر حسب رادیان و σ, τ, X, Y, Z و Q ثوابت مادی مربوط به آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ می‌باشند. این ثوابت به همراه ثابت B' مربوط به معادله (۹) در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

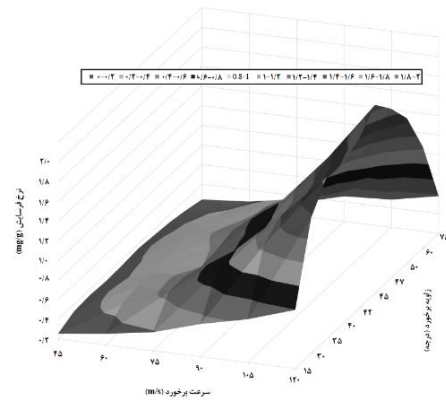
بنابراین در نهایت معادله (۹) به منظور پیش‌بینی فرسایش ذرات جامد آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ در بازه سرعت بین ۴۵ تا ۱۲۰ متر بر ثانیه و زاویه بین ۱۵ تا ۷۵ درجه، به صورت معادله (۹) ارائه خواهد شد.

$$E = v^{2.4342} [\sigma \sin(Q\alpha + X) + \tau \sin(Y\alpha + Z)] B' \quad (9)$$

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و تجربی را با نتایج حاصل از مدل ارائه‌شده در این رابطه برای سرعت‌های ۴۵ و ۱۲۰ متر بر ثانیه مقایسه می‌کنند. مشاهده می‌شود که در زاویه ۴۵ درجه از سرعت ۴۵ متر بر ثانیه، مدل پیشنهادی در معادله (۹) اندکی تخمین بالاتر از مقدار (Overestimation) از خود نشان می‌دهد. این مسئله ناشی از این است که در فرآیند برازش منحنی به کمک نرم‌افزار Matlab، شرایط بحرانی فرسایش در هر لحظه لحاظ گردید. در مجموع نتایج این دو شکل نشان می‌دهد که در دو کران بالا و

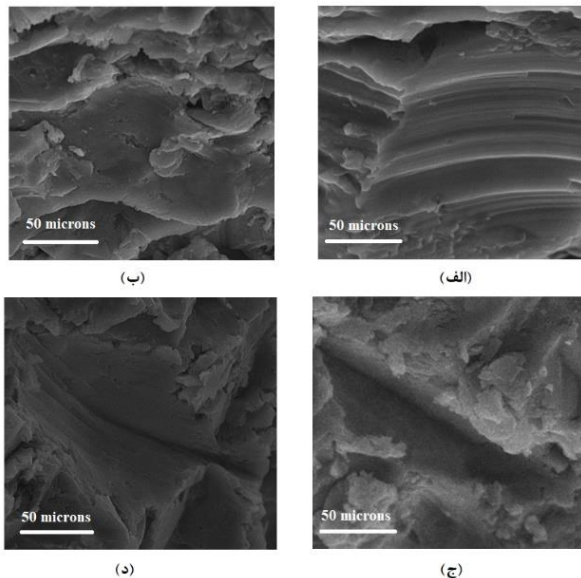


شکل ۶ کران‌های تنش فون - مایسز (گیگاپاسکال) در لحظه شروع آسیب در زوایای برخوردی (الف) ۱۵ درجه؛ (ب) ۴۵ درجه؛ (ج) ۷۵ درجه



شکل ۷ ارتباط همزمان نرخ فرسایش با سرعت ذرات فرساینده و زاویه برخورد

۱۰(ج))؛ تا جایی که در برخورد ۷۵ درجه و نزدیک به عمود، به وضوح جای ذره کروی در سطح که بیانگر سازوکار نفوذ است، مشهود می‌باشد (شکل ۱۰(د)). بررسی میزان تخریب سطح در مجموعه تصاویر میکروسکوپی در انطباق با نتایج نرخ فرسایش بوده و دلیل آن مربوط به حساسیت بیشتر آلیاژ در مقابل تنش‌های برشی نسبت به تنش‌های عمود بر سطح است.



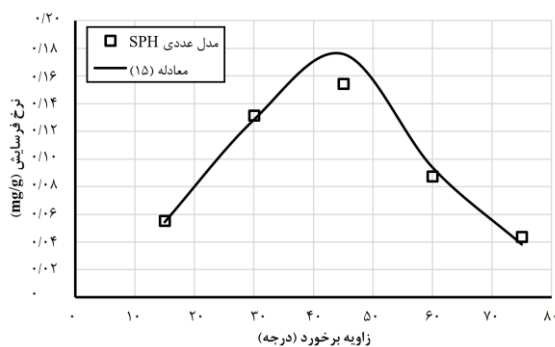
شکل ۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح آلیاژ پس از فرسایش ذرات جامد با سرعت ۷۵ متر بر ثانیه و زاویه برخورد (الف) ۱۵؛ (ب) ۴۵؛ (ج) ۶۰؛ (د) ۷۵ درجه

۶- نتیجه‌گیری

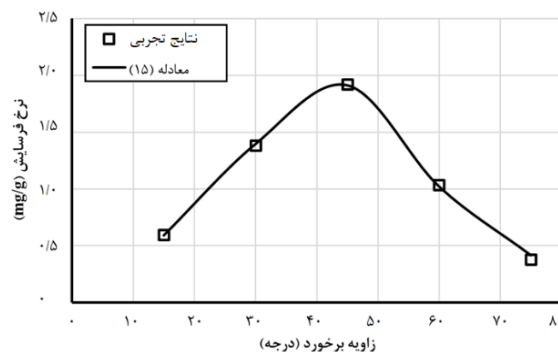
در این مقاله یک مدل‌سازی عددی با استفاده از روش SPH به منظور شبیه‌سازی فرسایش ذرات جامد برای آلیاژ تیتانیوم تحت برخورد ذرات آلومینای کروی به قطر ۸۵ میکرون ارائه گردید. تمرکز این تحقیق بر روی اثرات زاویه برخورد و سرعت ذرات فرساینده بر نرخ فرسایش بود و بدین منظور به ترتیب دو بازه گسترده و عملیاتی ۱۵ تا ۷۵ درجه و ۴۵ تا ۱۲۰ متر بر ثانیه برای این متغیرها تحت بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تغییرات سرعت و زاویه که از مدل SPH به دست آمده بود، با نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های فرسایش در شرایط مورد نظر مقایسه و اعتبارسنجی گردید. در ادامه با استفاده از این نتایج، معادله‌ای به منظور پیش‌بینی فرسایش در بازه سرعت و زاویه برخورد تحت بررسی ارائه گردید که از دقت مناسبی برخوردار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که سرعت ذرات با نرخ فرسایش یک رابطه توانی دارند. توان سرعت برای آلیاژ Ti-6Al-4V به‌طور میانگین برابر ۲/۴۳۴۲ و با تقریب بسیار مناسبی، مستقل از زاویه برخورد می‌باشد. همچنین پیشینه نرخ فرسایش در تمامی سرعت‌ها، برای زاویه برخوردی ۴۵ درجه ثبت شد که به دلیل اثر همزمان دو سازوکار فرسایش نفوذ و برش می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در طراحی‌های مربوط به

جدول ۶) ثوابت معادله (۹)

$B' [(mg/g) / (m/s)^{2.4342}]$	۰/۰۰۰۲۲۲
σ	۰/۰۶۵۶۷
Q	۲/۳۴۹
X	-۰/۱۵۷۸
τ	۰/۰۱۰۳۴
Y	۸/۴۶۷
Z	۱/۴۹۹



شکل ۸) مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی SPH و مدل پیش‌بینی از معادله (۹) در سرعت ۴۵ متر بر ثانیه



شکل ۹) مقایسه نتایج حاصل از نتایج تجربی و مدل پیش‌بینی از معادله (۹) در سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه

پایین سرعت، اختلاف بین نتایج عددی و تجربی و نتایج حاصل از برازش منحنی قابل صرف‌نظر می‌باشد. بنابراین معادله (۹) تخمین خوبی از نرخ فرسایش در شرایط تعریف شده در این مقاله ارائه می‌نماید.

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح آلیاژ پس از برخورد ذرات برای سرعت ثابت ۷۵ متر بر ثانیه در شکل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. برخورد ذرات با زاویه ۱۵ درجه شامل ایجاد یک شیار کم‌عمق و طویل شده و سازوکار شخم‌زنی (Plowing) را نشان می‌دهد (شکل ۱۰(الف))؛ درحالی‌که برخورد آن‌ها با زاویه ۴۵ درجه نشان‌دهنده یک تخریب بیشتر هم در طول سطح و هم در عمق آن می‌باشد و سازوکار برش را ارائه می‌نماید (شکل ۱۰(ب)). با افزایش زاویه‌ی برخورد تا ۶۰ درجه عمق محل اثر برخوردها بیشتر و طول آن‌ها کمتر و در عین حال از میزان تخریب کاسته شده (شکل

of Al 7075-T6 and Ti-6Al-4V alloys. AEROSPACE MECHANICS JOURNAL. 2020;16(4):13-24 (In Persian).

13- Gingold RA, Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly notices of the royal astronomical society. 1977;181(3):375-89.

14- Takaffoli M, Papini M. Numerical simulation of solid particle impacts on Al6061-T6 part I: three-dimensional representation of angular particles. Wear. 2012; 292:100-10.

15- Wang YF, Yang ZG. A coupled finite element and meshfree analysis of erosive wear. Tribology international. 2009;42(2):373-7.

16- Hadavi V, Papini M. Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials. Wear. 2015;342:310-21.

17- 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.

18- Mohammadi B, Khoddami A. Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2020; 234(8):1173-84.

19- Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics. Annual review of astronomy and astrophysics. 1992;30(1):543-74.

20- Schwer LE, Hacker K, Poe K. Perforation of metal plates: laboratory experiments and numerical simulations. In Proceedings to the 9th Annual LS DYNA users conference 2006.

21- ASTM G76. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets.

22- Finnie I. Erosion of surface by solid particles. wear. 1960; 3:87-103.

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

24- Bitter JG. A study of erosion phenomena: Part II. Wear. 1963;6(3):169-90.

25- Neilson JH, Gilchrist A. Erosion by a stream of solid particles. Wear. 1968;11(2):111-22.

26- Hashish M. An improved model of erosion by solid particle impact. In Erosion by Liquid and Solid Impact, Seventh International Conference 1987 (p. 66).

27- Davis JR, editor. Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM international; 2001.

28- Yerramareddy S, Bahadur S. Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V. Wear. 1991;142(2):253-63.

29- Mohammadi B, Khoddami A, Pourhosseinshahi M. Numerical and experimental investigation of erosive wear of Ti-6Al-4V alloy. Journal of Tribology. 2019;141(10).

30- Wood RJ. The sand erosion performance of coatings. Materials & design. 1999;20(4):179-91.

فرسایش به عنوان یک سازوکار آسیب، مانند طراحی پره کمپرسور توربین گاز، کافی است که محاسبات برای این زاویه بحرانی انجام شود تا خرابی فرسایش ناشی از سایر زوایای برخوردی را نیز در بر بگیرد.

تأییدیه‌های اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتوای نشریه منتج از فعالیت‌های علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار آن بر عهده ایشان می‌باشد.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با پایان‌نامه و طرح پژوهشی ندارد.

منابع مالی/حمایت‌ها: توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- 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):877-87.
- 2- Sundararajan G, Roy M. Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures. Tribology International. 1997;30(5):339-59.
- 3- Pena A, Gallardo EA, Moran A, Bravo JA, Vite M. Micro-abrasion study of some dental restorative materials and enamel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2013; 227(5):486-495.
- 4- Rajahram SS. Erosion-corrosion mechanisms of stainless steel UNS S31603 (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- 5- Grewal HS, Agrawal A, Singh H. Identifying erosion mechanism: A novel approach. Tribology Letters. 2013;51(1):1-7.
- 6- Khan AS, Yu S. Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy. Part I: Experiments. International Journal of Plasticity. 2012;38:1-3.
- 7- Nixon ME, Cazacu O, Lebensohn RA. Anisotropic response of high-purity α -titanium: Experimental characterization and constitutive modeling. International Journal of Plasticity. 2010;26(4):516-32.
- 8- ElTobgy MS, Ng E, Elbestawi MA. Finite element modeling of erosive wear. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005;45(11):1337-46.
- 9- 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):900-6.
- 10- Wang YF, Yang ZG. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. Wear. 2008;265(5-6):871-8.
- 11- Khoddami A, Salimi-Majd D, Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating. Surface and Coatings Technology. 2019;372:173-89.
- 12- Saebi D, Khoddami A, Mohammadi B. Finite element investigation of multiple solid particle erosion