

بررسی فرسایش ذرات جامد چندگانه در آلیاژهای

Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V به روش اجزای محدود

بیژن محمدی^{*۳}

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۶)

امیرسجاد خدای^۲

دانیال صائبی^۱

دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجفآباد

چکیده

در تحقیق حاضر، فرسایش ذرات جامد آلیاژهای Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V، به عنوان دو آلیاژ متداول مورد استفاده در سازه هواپیما تحت برخورد ذرات چندگانه، با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود بررسی می‌گردد. رفتار فرسایشی این دو آلیاژ بر اساس معادلات ساختاری جانسون - کوک و به صورت یک مسأله ضربه در مقیاس کوچک، با استفاده از روش المان حجم نمونه شبیه‌سازی شده است. رفتار فرسایشی مواد معمولاً به صورت نسبت ماده فرسایش‌یافته از سطح آلیاژ به جرم ذرات فرساینده تعریف شده که از آن به عنوان نرخ فرسایش تعبیر می‌گردد. در این تحقیق، در ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود با نتایج روش‌های تحلیلی رایج در فرسایش صحت‌سنجی می‌گردد. سپس دو عامل اصلی مؤثر بر رفتار فرسایشی آلیاژها، یعنی سرعت ذرات برخوردکننده و زاویه برخورد ذرات مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بین سرعت ذرات و نرخ فرسایش یک رابطه توانی برقرار است. مطابق نتایج، حداکثر نرخ فرسایش آلیاژ Ti-6Al-4V برای زاویه برخوردی ۴۰ درجه و بیشینه نرخ فرسایش آلیاژ Al 7075-T6 در زاویه برخوردی ۳۰ درجه به ثبت رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که آلیاژ Ti-6Al-4V در مقابل فرسایش مقاوم‌تر از آلیاژ Al-7075 می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش ذرات جامد، برخورد ذرات چندگانه، مدل جانسون - کوک، روش المان محدود

Investigation of Multiple Solid Particle Erosion of Al 7075-T6 and Ti-6Al-4V Alloys by Finite Element Method

D. Saebi

A.S. Khoddami

B. Mohammadi

Faculty of Materials Science and Engineering
Islamic Azad University, Najafabad Branch

School of Mechanical Engineering
Iran University of Science and Technology

(Received: 27/April/2019; Accepted: 27/December/2019)

ABSTRACT

In this study, the solid particle erosion of Al 7075-T6 and Ti-6Al-4V alloys, as two typical alloys in an aircraft structure, under multiple particle impact is investigated using finite element modeling. The erosive behavior of these alloys has been simulated as a micro scale impact model based on Johnson-Cook constitutive equations using the representative volume element technique. Erosive behavior is usually described by the ratio of the eroded material of the alloy surface to the mass of the eroding particles which is called the erosion rate. In this study, the results of the finite element model are validated by comparison with the results of typical erosion models. Then, the two most effective factors on erosive behavior, impacting particles' velocity and particles' impact angle, are to be investigated. Results show that there is an exponential relation between the particles' velocity and the erosion rate. According to the results, maximum erosion rates of Ti-6Al-4V and Al 7075-T6 have been recorded at the impact angles of 40 and 30 degrees, respectively. It is shown that Ti-6Al-4V is more erosion-resistant than Al 7075-T6.

Keywords: Solid particles erosion, Multiple particles impact, Johnson-Cook model, Finite element method.

۱- دانشجوی کارشناسی: daniyalsaebi@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: a_khoddami@mecheng.iust.ac.ir

۳- دانشیار (نویسنده پاسخگو): bijan_mohammadi@iust.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

A	استحکام تسلیم مدل جانسون - کوک، MPa
E	J انرژی جنبشی ذرات،
d	توان انرژی جنبشی
n	توان سخت‌شوندگی مدل جانسون - کوک
r	توان سرعت ذرات
C	ثابت نرخ کرنش مدل جانسون - کوک
m	ثابت نرم‌شوندگی مدل جانسون - کوک
T_{melt}	K دمای ذوب ماده هدف،
T	K دمای عملکردی،
T_{ref}	K دمای مرجع استخراج خواص مدل جانسون - کوک،
v	m/s سرعت ذرات فرساینده،
B	MPa ضریب سخت‌شوندگی مدل جانسون - کوک،

علائم یونانی

$\bar{\sigma}$	تنش تسلیم جانسون - کوک
σ_s	تنش هیدرواستاتیک
α	deg زاویه برخورد ذرات،
$\bar{\epsilon}^{pl}$	کرنش پلاستیک
ϵ_f^{pl}	کرنش پلاستیک معادل در زمان واماندگی
ϵ	mg/g یا m^3/g نرخ فرسایش،
$\dot{\epsilon}_s^{pl}$	1/s نرخ کرنش پلاستیک مرجع،
$\dot{\epsilon}^{pl}$	1/s نرخ کرنش پلاستیک معادل،

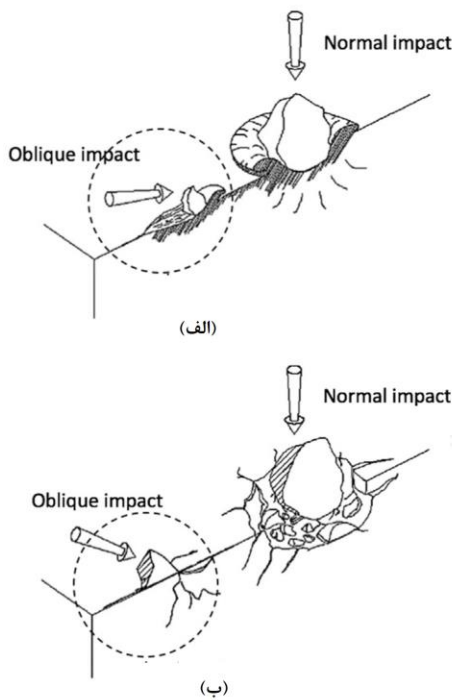
۱- مقدمه

ذرات جامد بسیار کوچک که به صورت معلق در سیالات حرکت می‌کنند، با برخورد پرسرعت و تکرارشونده به سطوح جامد، نوعی از خرابی را به آن‌ها تحمیل می‌نمایند. این نوع از خرابی که عمدتاً ماهیت فیزیکی و مکانیکی در آن پررنگ می‌باشد، فرسایش ذرات جامد^۱ نامیده می‌شود. فرسایش ذرات جامد می‌تواند مستقلاً موجب واماندگی گردد و یا دارای اثرات کاهنده بر مقاومت خستگی مواد از طریق ایجاد ترک و تمرکز تنش در نواحی برخورد و تغییر شکل‌های پلاستیک ناشی از برخورد ذرات باشد [۱].

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

فرسایش حجمی (mm^3/g) نسبت حجم ماده حذف‌شده از سطح هدف به جرم کل ذرات برخوردکننده می‌باشد.

سازوکارهای فرسایش به دو دسته عمده فرسایش ترد و فرسایش نرم تقسیم‌بندی می‌گردد. حذف ماده در موادی مانند سرامیک‌ها، به دلیل رشد و پیوند ترک‌های ایجادشده در اثر برخورد ذرات به سطح اتفاق می‌افتد. در واقع انرژی ذرات برخوردکننده موجب ترک‌خوردگی‌های 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 سطح هدف می‌گردد. 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 موادی 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 می‌گردد. مقدار فرسایش بیشینه در این مواد در زوایای برخوردی پایین (۲۰ تا ۴۰ درجه) اتفاق می‌افتد [۲-۳]. شکل ۱ به صورت طرح‌واره، نمونه‌ای از فرسایش ذره جامد نرم و ترد را نشان می‌دهد.



شکل (۱): سازوکارهای فرسایش ذره؛ (الف) مواد نرم، (ب) مواد ترد [۴].

¹ Solid particles erosion

۷۷۷ و حدود ۷۵٪ از بدنه ایرباس ۳۴۰ را تشکیل می‌دهد [۹و۸]. در میان آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده، آلیاژ Al 7075-T6 به علت نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت ماشین‌کاری مناسب و قیمت نسبتاً پایین به طور گسترده در سازه‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. از سوی دیگر، آلیاژهای تیتانیومی به دلیل استحکام بالا و در عین حال وزن بسیار کم، مقاومت به فرسایش مناسب و توانایی حفظ خواص در دماهای بالا به‌عنوان آلیاژهای پراستفاده در صنایع هوایی شناخته می‌شوند. این آلیاژها در مقایسه با فولادها و آلومینیوم‌ها دارای نسبت استحکام به وزن بالاتری می‌باشند. این موضوع موجب افزایش استفاده از آن‌ها در بدنه هواپیماها در دهه‌های اخیر گردیده است [۹]. اولین مورد استفاده از آلیاژ تیتانیومی در صنعت هوایی را می‌توان در اواسط دهه ۶۰ میلادی و به یکی از محصولات شرکت لاکهید^۱ با نام SR-71 Blackbird نسبت داد [۱۰]. عمده بخش‌های این محصول از تیتانیوم ساخته شده؛ به نحوی که در حدود ۹۳٪ از آن را آلیاژهای تیتانیومی تشکیل می‌دهد [۱۱]. قیمت بالای تیتانیوم، استفاده گسترده از آلیاژهای آن را محدود کرده است. با این حال کارایی مناسب این آلیاژها در دماهای بالا موجب شده که در اطراف موتور و نقاط حساس بدنه و بال هواپیما به طور گسترده از آن استفاده شود. علاوه بر موتور که در حدود ۳۶٪ آن را آلیاژهای تیتانیومی تشکیل می‌دهد، به طور میانگین ۷٪ وزن سازه هواپیماهای مسافربری نیز از این آلیاژ تشکیل شده است. به طور خاص، ۹٪ بدنه هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ متشکل از آلیاژهای تیتانیومی می‌باشد. این در حالی است که در هواپیماها و بالگردهای نظامی که مسائل اقتصادی دارای اهمیت کمتری می‌باشد، آلیاژهای تیتانیومی سهم قابل توجهی از بدنه را به خود اختصاص داده‌اند که این عدد تا ۵۰٪ نیز ثبت شده است [۱۱]. تیتانیوم گرید ۵ که در صنعت از آن به Ti-6Al-4V نیز تعبیر می‌شود، به عنوان پرکاربردترین آلیاژ تیتانیومی، بیش از ۸۰ درصد سازه‌های تیتانیومی را در مقایسه با سایر آلیاژهای تیتانیوم‌پایه تشکیل می‌دهد [۱۲].

فرسایش ذرات جامد در عملکرد هواپیماهای بال ثابت و هم‌چنین بالگردها می‌تواند به مسأله چالش برانگیزی تبدیل شود. در سال ۲۰۱۰، فوران یک آتشفشان ایسلندی و خطرات ناشی از فرسایش ذرات جامد در موتورهای هواپیماها، منجر به بزرگترین تعطیلی سفرهای هوایی غیرنظامی از زمان جنگ جهانی دوم شد [۲]. هم‌چنین در تاریخ ۲۱ خردادماه ۹۷ پرواز شماره ۸۴۵ شرکت هواپیمایی آسمان با هواپیمای ATR72 به شماره ثبت EP-ATX در حین فرود در فرودگاه مهرآباد تهران دچار حادثه جدی شد. بررسی گزارش این حادثه نشان می‌دهد که برخورد ذرات ماسه و شن به بدنه در هنگام تقرب هواپیما به عنوان موارد خطرناک و مؤثر حادثه به ثبت رسیده است [۵].

مطالعات بنیادین فرسایش برای اولین بار در آلمان آغاز شده است. در اولین آزمایش‌ها، پژوهشگران صفحات باریکی را تحت برخورد جریان کوارتز در جهت عمود بر سطح قرار داده و دریافتند که کاهش وزن همه فولادها مشابه یکدیگر است. البته این نتیجه با نتیجه فرسایش در شرایط واقعی منطبق نبود؛ چراکه لوله‌های انتقال سیالی که از جنس فولاد سخت بودند، عمر طولانی‌تری نسبت به فولادهای نرم از خود نشان دادند. با این حال، اولین تلاش منطبق با روش‌های علمی برای جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های تجربی در فرآیند فرسایش توسط ولینجر تحت انواع مختلفی از شرایط کنترل‌شده انجام پذیرفت [۶]. تا مدت‌ها پژوهش‌های حوزه فرسایش صرفاً به‌صورت تجربی انجام می‌گرفت تا این‌که با گسترش روش‌های المان محدود و بررسی فرسایش بر اساس مسائل ضربه و خستگی، این نوع از خرابی نیز از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.

در دهه اخیر، استفاده از مواد مرکب در سازه‌های هوایی در مقایسه با آلیاژهای فلزی افزایش چشمگیری داشته است. با این حال، آلیاژهای فلزی و به خصوص آلیاژهای آلومینیومی هم‌چنان نقش بسزایی در این سازه‌ها ایفا می‌کنند [۷]. آلیاژهای آلومینیومی از بیش از ۸۰ سال پیش تاکنون در سازه‌های هوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در میان آلیاژهای فلزی مورد استفاده در بدنه هواپیماهای مسافربری، آلیاژهای آلومینیومی ۸۱٪ وزنی بوئینگ ۷۴۷ و ۷۰٪ وزنی بوئینگ

¹ Lockheed

از جمله تلاش‌های تجربی در حوزه فرسایش، می‌توان به آزمایش‌های یراماردی و بهادر [۲۰] در بررسی اثر زاویه، سرعت و اندازه ذرات فرساینده بر فرسایش ذرات جامد آلیاژ Ti-6Al-4V اشاره نمود. وینکلن و همکارانش [۲۱] نیز به بررسی اثر دما بر سازوکارهای فرسایش پرداختند. آوکو و همکاران [۲۲] و آتراشنکو و همکاران [۲۳] از دیگر پژوهشگرانی بودند که به صورت تجربی اثر فرسایش ذرات جامد را به طور خاص بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار دادند. این در حالی است که نوید و همکارانش [۲۴] با تمرکز بر اثر شکل ذرات جامد در زاویه برخوردی ۹۰ درجه، آزمایش‌هایی را برای آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ تدوین کردند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که سازوکار تغییر شکل فرسایش نرم در آلیاژ مذکور فعال می‌باشد. خدای و همکاران [۲۵] نیز با بررسی تجربی نشان دادند که حداکثر نرخ فرسایش در آلیاژهای بدون پوشش Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی نزدیک به ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد.

به منظور نحوه انتخاب اندازه، جنس، سرعت و زاویه برخورد ذرات فرساینده و نیز سایر متغیرها در موضوع فرسایش می‌توان به استانداردهای ASTM G 76 [۲۶] برای آلیاژهای بدون پوشش و ASTM D 698 [۲۷] برای آلیاژهای پوشش‌دار مراجعه نمود. با این حال این استانداردها منطبق با شرایط عملکردی سازه‌ها قابل بازنگری و تصحیح می‌باشند. گزارش‌های فنی و صنعتی منتشرشده عمدتاً در راستای تصحیح این استانداردها قدم برداشته‌اند. در این گزارش‌ها بسته به اندازه قطعات هواپیما، سرعت جریان هوای گذرنده از بدنه و موتور هواپیماها، جنس غالب ذرات برخوردکننده در نقاط مختلف جهان و سایر الزامات، پیشنهادهایی برای انجام آزمایش‌های فرسایش و یا شبیه‌سازی رایانه‌ای ارائه گردیده است. از جمله گزارش‌های مذکور می‌توان به گزارش فنی منتشرشده توسط شرکت EPRI [۲۸] اشاره نمود.

در این تحقیق، فرسایش ذرات جامد چندگانه در دو آلیاژ آلومینیومی Al 7075-T6 و تیتانیومی Ti-6Al-4V به عنوان آلیاژهای متداول مورد استفاده در بدنه هواپیما مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور شبیه‌سازی سه بعدی رفتار فرسایشی ماده از روش المان محدود استفاده و تحلیل

شبیه‌سازی‌های المان محدود در حوزه فرسایش با گذشت زمان تدریجاً تکامل یافته‌اند [۱۳]. برخی از آن‌ها به شبیه‌سازی برخورد تک‌ذره و برخی دیگر به شبیه‌سازی برخورد ذرات چندگانه می‌پردازند. العالم و لی [۱۴] با فرض کرنش صفحه‌ای و با صرف‌نظر از یکی از مؤلفه‌های کرنش در معادلات کرنش - سختی خود، یک نمونه شبیه‌سازی دینامیکی به صورت دو بعدی ارائه نمودند. گریفین و همکارانش [۱۵] یک شبیه‌سازی دینامیکی صریح سه بعدی انجام دادند تا رفتار فرسایشی مربوط به برخورد پنج ذره کروی سیلیکا به یک سطح هدف را توصیف کند. آن‌ها کاهش جرم هدف در اثر خرابی انباشته‌شده را به صورت تابعی از زاویه برخورد ارائه نمودند. برخی شبیه‌سازی‌های متقارن محوری برای یک بستر آلیاژ Ti-6Al-4V ایجاد و بر اساس معادلات جانسون - کوک به بررسی اثر برخی از متغیرها بر رفتار فرسایشی ماده پرداخته شده است. نشان داده شده که حداکثر نرخ فرسایش در حوالی زاویه برخورد ذرات ۴۰ درجه اتفاق می‌افتد. وانگ و یانگ [۴] یک شبیه‌سازی المان محدود سه بعدی 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 ساختاری جانسون - کوک، صد ذره کروی را با استفاده از یک روش تصادفی شبیه‌سازی کردند تا به طور همزمان به سطح هدف برخورد نمایند. شبیه‌سازی آن‌ها حداکثر نرخ فرسایش را برای این آلیاژ تیتانیومی در زاویه برخوردی ۳۰ درجه ثبت نمود. تکفلی و پاپینی [۱۶ و ۱۷] یک شبیه‌سازی برای فرسایش ذرات جامد چندگانه به سطح یک آلیاژ آلومینیومی برمبنای معادلات ساختاری جانسون - کوک ارائه نمودند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی خود مقایسه و صحت‌سنجی کردند. الفحطانی و همکارانش [۱۸] نیز مقاومت فرسایشی آلیاژهای آلومینیومی را برای دو زاویه برخورد ذرات ۳۰ و ۹۰ درجه بررسی کرده و نشان دادند که زاویه برخوردی ۳۰ درجه برای آلیاژهای آلومینیومی به مراتب بحرانی‌تر می‌باشد. اخیراً نیز عرب‌نژاد و همکارانش [۱۹] با تمرکز بر شکل و اندازه ذرات فرساینده، معادلاتی برای پیش‌بینی فرسایش سطوح ارائه نموده‌اند.

ماده به دست می‌آید. $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ کرنش مرجع است که مقدار آن معمولاً $1s^{-1}$ لحاظ می‌گردد. 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. روش واماندگی جانسون - کوک فرض می‌کند که در هنگام ایجاد کرنش‌های پلاستیک، خرابی در المان‌های ماده انباشته می‌شود. زمانی که این خرابی انباشته شده به مقدار بحرانی خود می‌رسد به طور ناگهانی شتاب گرفته و موجب واماندگی آن المان‌ها می‌گردد. روش مذکور پارامتر خرابی (D) خود را به صورت معادله (۳) تعریف می‌نماید. این پارامتر بین مقدار صفر (برای ماده بکر) و یک (برای ماده کاملاً وامانده) متغیر می‌باشد [۲۹].

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

شکل گام‌به‌گام^۳ از کرنش پلاستیک معادل است. جمع (\sum) روی همه گام‌های تغییر شکل انجام می‌شود. کرنش پلاستیک معادل در زمان واماندگی است که در معادله (۴) معرفی شده است [۲۹].

$$\epsilon_f^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 (\frac{\sigma_m}{\sigma}))][1 + D_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0^{pl}})][1 + D_5 T^*] \quad (4)$$

که در آن σ_m تنش هیدرواستاتیک و D_1 تا D_5 ثوابت ماده می‌باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی و جدول ۲ ثوابت معادلات (۱) تا (۴) را برای آلیاژ Ti-6Al-4V و Al 7075-T6 نشان می‌دهد.

جدول (۱): خواص مکانیکی آلیاژها [۳۲ و ۴].

Ti-6Al-4V	Al 7075-T6	خواص
۴۴۲۸	۲۸۰۴	چگالی (kg/m^3)
۱۰۹/۸	۷۱/۷	مدول یانگ (GPa)
۰/۳۱	۰/۳۳	نسبت پواسون

به صورت دینامیکی صریح توسط نرم‌افزار Abaqus 6.14 انجام شد. از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به این مسأله اشاره نمود که برخورد چندگانه ذرات به ماده هدف به صورت مسأله ضربه در مقیاس میکرو در نظر گرفته شده و از روش المان حجم محدود (RVE)^۱ به منظور کاهش هزینه‌های شبیه‌سازی استفاده گردیده است. هم‌چنین از دیگر نوآوری‌ها می‌توان به مقایسه همزمان مقاومت فرسایشی دو آلیاژ متداول در بدنه و موتور هواپیما اشاره نمود. در این تحقیق رفتار فرسایشی ماده هدف با رفتار پیش‌بینی شده توسط معادله‌های به دست آمده از روش تحلیلی رایج در حوزه فرسایش اعتبارسنجی گردید. سپس اثر زاویه برخورد ذرات و سرعت برخورد آن‌ها بر نرخ فرسایش آلیاژها مورد ارزیابی و مقایسه با پژوهش‌های تجربی پیشین قرار گرفت.

۲- معادلات ساختاری ماده

معادله جانسون - کوک [۲۹] یک رابطه ساختاری متداول برای فلزات ارائه می‌دهد و به طور گسترده در شبیه‌سازی مسائل مرتبط با ضربه و نفوذ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۰ و ۳۱]. فرسایش ذرات جامد را می‌توان به صورت یک مسأله ضربه در مقیاس بسیار کوچک (میکرون) شبیه‌سازی و برای توصیف رفتار ماده هدف از معادلات ساختاری جانسون - کوک استفاده نمود.

معادله پلاستیسیته جانسون - کوک وابستگی قانون جاری شدن پلاستیک^۲ ($\bar{\sigma}$) را به کرنش پلاستیک ($\bar{\epsilon}^{pl}$)، نرخ کرنش پلاستیک معادل ($\dot{\epsilon}^{pl}$) و دمای عملکردی (T) توصیف می‌نماید. در معادله (۱)، رابطه سخت‌شوندگی جانسون - کوک نشان داده شده است [۲۹].

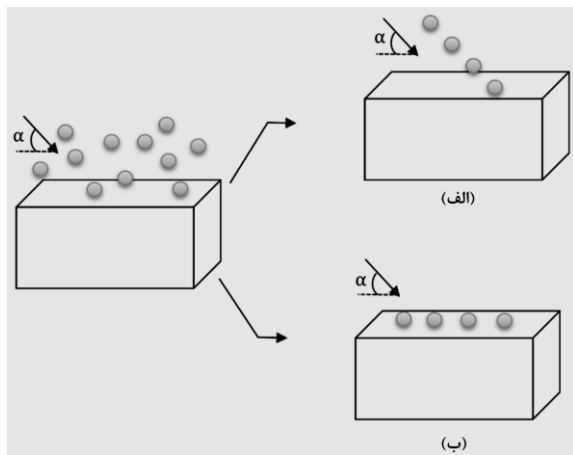
$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0^{pl}})][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

A استحکام تسلیم، B ضریب سخت‌شوندگی، n توان سخت‌شوندگی، C ثابت نرخ کرنش و m ثابت نرم‌شوندگی معادله جانسون - کوک بوده و از طریق آزمایش برای هر

¹ Representative volume element

² Plastic flow rule

³ Incremental



شکل (۲): برخورد های ذرات فرساینده ی چندگانه الف) هم مکان ب) هم زمان.

در تحقیق حاضر، به منظور در نظر گرفتن اثر برخورد ذرات چندگانه، به جای شبیه سازی یک نمونه کامل تحت فرسایش، از المان حجم نمونه (RVE) استفاده می گردد. المان حجم نمونه، کوچک ترین بخش از یک نمونه است که می تواند با استفاده از قیود مناسب، رفتار فرسایشی کل نمونه را نمایندگی کند. در واقعیت، با کنار هم قرار دادن تعداد زیادی از این RVEها (هر RVE تحت برخورد یک ذره فرساینده قرار دارد) می توان نمونه کامل را تشکیل داد که مؤید شبیه سازی برخورد هم زمان دسته ای از ذرات با کل نمونه هدف می باشد. با این حال، با توجه به این که هر RVE به طور مستقل نماینده تمام و کمال رفتار فرسایشی کل نمونه است، می توان نتیجه گرفت که با شبیه سازی رفتار فرسایشی یک المان حجم نمونه، رفتار فرسایشی کل نمونه اصلی شبیه سازی شده است.

ابعاد مساحت سطح هدف و ضخامت المان حجم نمونه به نحوی انتخاب می شود که با حرکت کامل یک ذره (با هر زاویه برخوردی) سازگار باشد. در واقع، مساحت سطح هدف RVE به اندازه ای گسترش می یابد که در زوایای برخوردی پایین، حرکت ذره به طور کامل در آن انجام پذیرد. یعنی ذره برخورد کننده به سطح برخورد کند، حذف ماده از سطح هدف به طور کامل انجام شود و در نهایت ذره سطح را ترک کند یا داخل آن متوقف گردد. همچنین در زوایای برخوردی بالا، ضخامت RVE به اندازه ای گسترش می یابد که ذره درون ضخامت آن حرکت کرده و فرسایش انجام شود؛ تا جایی که ذره متوقف گردد و یا از سطح RVE

جدول (۲): ثوابت معادلات ساختاری [۴ و ۳۳ و ۳۴].

Ti-6Al-4V	Al 7075-T6	ثابت معادله
۱۰۹۸	۵۴۶	(MPa)A
۱۰۹۲	۶۷۸	(MPa)B
۰/۹۳	۰/۷۱	n
۰/۰۱۴	۰/۰۲۴	C
۱/۱	۱/۵۶	m
۲۹۷	۲۹۷	(K) T _{ref}
۱۸۷۸	۴۷۷	(K) T _{melt}
-۰/۰۹	-۰/۰۶۸	D ₁
۰/۲۷	۰/۴۵۱	D ₂
۰/۴۸	-۰/۹۵۲	D ₃
۰/۰۱۴	۰/۰۳۶	D ₄
۳/۸۷	۰/۶۹۷	D ₅

۳- شبیه سازی

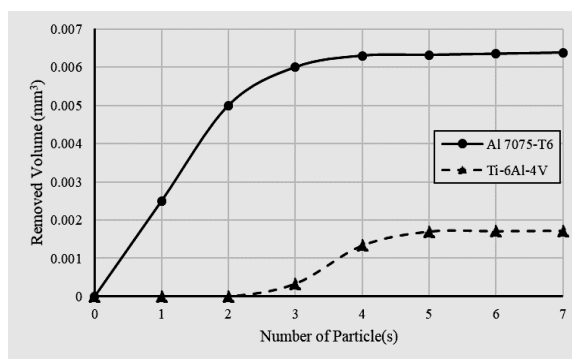
زمانی که یک ذره جامد به سطحی برخورد می کند، بخش هایی از سطح ماده صرفاً دچار تغییر شکل پلاستیک شده و حذف ماده از سطح به وقوع نمی پیوندد. این مسئله موجب می شود که ماده دچار کرنش سختی گردد. بنابراین در شبیه سازی هایی که فقط برخورد تک ذره را در نظر گرفته اند، این اثر مهم لحاظ نشده است. بر این اساس، شبیه سازی برخورد ذرات چندگانه به سطح هدف ضروری به نظر می رسد.

برخورد های چندگانه با یک زاویه مشخص را می توان به صورت ترکیبی از دو وضعیت «هم مکان»^۱ و یا «هم زمان»^۲ توصیف نمود. مطابق شکل ۲- الف اگر تعدادی از ذرات به نقطه مشخصی از سطح هدف برخورد کنند، برخورد ذرات چندگانه هم مکان به وقوع پیوسته است. از طرفی مطابق شکل ۲- ب ذراتی که در یک زمان یکسان به کل سطح هدف اصابت می کنند، نمایانگر برخورد ذرات چندگانه هم زمان می باشند. بنابراین، اگر بتوان برخوردهای هم مکان و هم زمان ذرات را در شبیه سازی در نظر گرفت، عملاً برخورد ذرات چندگانه مدل سازی می شود.

¹ Consecutive

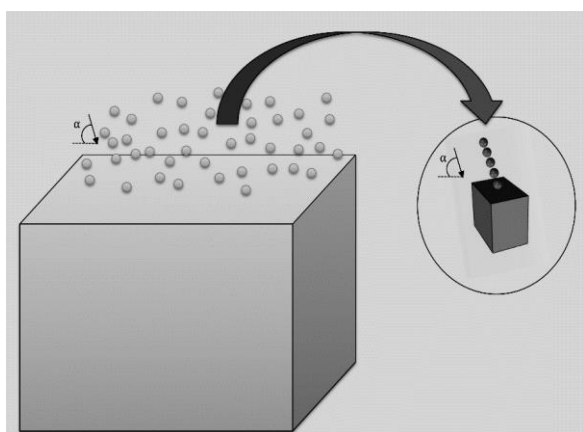
² Simultaneous

مشاهده می‌شود که در شرایط مذکور، برخوردهای یک و دو ذره از آلومینا موجب حذف ماده از سطح هدف Ti-6Al-4V نمی‌گردد و حذف ماده از برخورد سوم به بعد اتفاق می‌افتد. این، در حالی است که برای آلیاژ Al 7075-T6 از همان برخورد ذره اول، حذف ماده از RVE آغاز می‌شود.



شکل (۴): اثر تعداد ذرات برخوردکننده بر حجم حذف‌شده از یک RVE به منظور مدل‌سازی برخورد هم‌مکان ذرات.

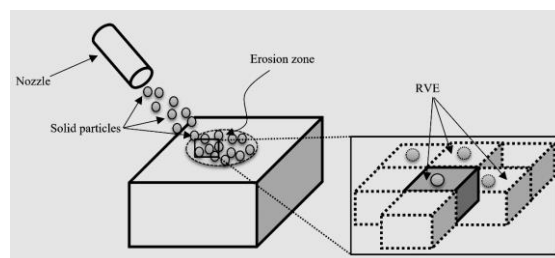
بنابراین، مطابق شکل ۵، به جای مدل‌سازی کامل یک نمونه و برخورد نامنظم تعداد زیادی ذره فرساینده تحت زاویه یکسان، تعداد پنج ذره به صورت هم‌مکان به یک RVE اصابت داده می‌شود.



شکل (۵): روش پیشنهادی به منظور شبیه‌سازی برخورد چندگانه ذرات فرساینده به سطح نمونه.

لازم به ذکر است که المان مورد استفاده از نوع هشت‌گره‌ای با کد C3D8R انتخاب گردید. شکل ۶ نمایی از مدل المان محدود RVE تحت برخورد هم‌زمان پنج ذره را بعد از برخورد و حذف المان نشان می‌دهد.

بازتاب پیدا کند. با اعمال این قیود، اندازه هر سه بعد RVE، یعنی ابعاد مساحت سطح هدف و همچنین ضخامت آن تعیین می‌گردد. با در نظر گرفتن شرایط مذکور، ابعاد RVE تحقیق حاضر به صورت ۰/۶ در ۰/۴ در ۰/۵ میلی‌متر به دست آمد. شکل ۳ استفاده از RVE به جای یک نمونه کامل را به خوبی توصیف می‌نماید.



شکل (۳): المان حجم نمونه (RVE) از نمونه اصلی به منظور شبیه‌سازی برخورد هم‌زمان ذرات.

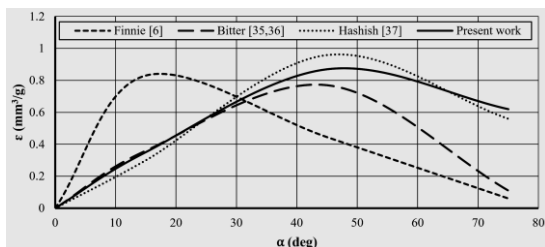
به منظور در نظر گرفتن اثر برخورد هم‌مکان ذرات چندگانه بر رفتار فرسایشی ماده هدف، شبیه‌سازی برخورد ذرات به المان حجم نمونه با یک تک‌ذره آغاز شده و حجم حذف‌شده از سطح محاسبه می‌گردد. سپس شبیه‌سازی برای دو ذره برخوردکننده متوالی در یک محل انجام و حجم حذف‌شده کل مجدداً محاسبه می‌گردد. این روش برای سه، چهار و تعداد بیشتر ذرات ادامه می‌یابد تا این‌که حجم حذف‌شده کل به مقدار پایایی رسیده و افزایش تعداد ذرات برخوردکننده، تأثیر چشمگیری بر حجم حذف‌شده از سطح ماده در اثر فرسایش نداشته باشد.

برای بررسی این موضوع، شبیه‌سازی برای ذرات کروی برخوردکننده از جنس آلومینا (Al_2O_3) به صورت جسم صلب و با چگالی ۳۹۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطر ۱۰۰ میکرون با زاویه برخورد ۳۰ درجه و سرعت برخورد ۷۵ متر بر ثانیه انجام شد. شکل ۴ نشان می‌دهد که در آلیاژ Al 7075-T6 از ذره چهارم به بعد با افزایش تعداد ذرات، تغییر زیادی در حجم حذف‌شده ایجاد نمی‌شود. این نتیجه برای آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از برخورد هم‌مکان پنج ذره به دست می‌آید. بنابراین در صورتی که برای هر دو آلیاژ، شبیه‌سازی برای پنج ذره برخوردکننده انجام شود، اثر برخورد ذرات بیشتر هم لحاظ خواهد شد و در نتیجه شبیه‌سازی تعداد بیشتری از ذرات برخوردکننده ضروری نمی‌باشد. همچنین

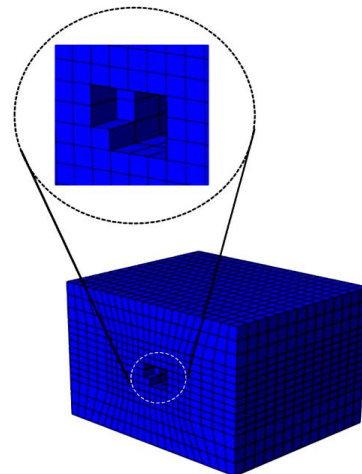
۷۵ متر بر ثانیه به سطح یک هدف Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی بین ۱۵ تا ۷۵ درجه و در دمای محیط اصابت و اعتبارسنجی در این شرایط بررسی گردید. روش‌های تحلیلی فرسایش فینی [۶]، بیتر [۳۵ و ۳۶] و هشیش [۳۷] به‌عنوان معیار این اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است.

بر اساس شکل ۸، معادله فینی یک تخمین بالاتر از حد حجم حذف‌شده نسبت به شبیه‌سازی المان محدود کار حاضر برای زوایای برخوردی کمتر از ۳۰ درجه و یک تخمین زیر حد برای زوایای برخوردی بیش از ۳۰ درجه نشان می‌دهد. معادله فینی به طور کلی برای زوایای برخوردی بالا یک تخمین زیر حد درست ارائه کرده و دارای دقت کمی می‌باشد [۳۸]. از طرف دیگر، انطباق مناسبی بین نرخ فرسایش محاسبه‌شده از معادله بیتر و نتایج شبیه‌سازی المان محدود در زوایای برخوردی کمتر از ۳۰ درجه به‌دست آمده؛ در حالی که برای زوایای بیش از ۳۰ درجه، مقادیر نرخ فرسایش معادله بیتر کمتر از شبیه‌سازی المان محدود کار حاضر می‌باشد. این در حالی است که سازگاری بسیار مناسبی بین نرخ فرسایش حجمی محاسبه‌شده از طریق معادله هشیش و شبیه‌سازی المان محدود تحقیق حاضر برای تمام زوایای برخوردی ارائه شده است. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان به اثر شکل ذره لحاظ‌شده در معادله هشیش نسبت داد؛ چراکه بر خلاف معادله‌های قبلی، این معادله به طور خاص، کروی بودن ذرات برخوردکننده را در محاسبات خود لحاظ می‌نماید.

در مجموع، مقدار نرخ فرسایش حجمی محاسبه‌شده توسط شبیه‌سازی المان محدود این تحقیق از محدوده مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رایج فرسایش انحراف زیادی ندارد و به طور خاص تطابق بسیار مناسبی با معادله هشیش از خود نشان می‌دهد. بنابراین، صحت نتایج به دست‌آمده از این روش تأیید می‌گردد.

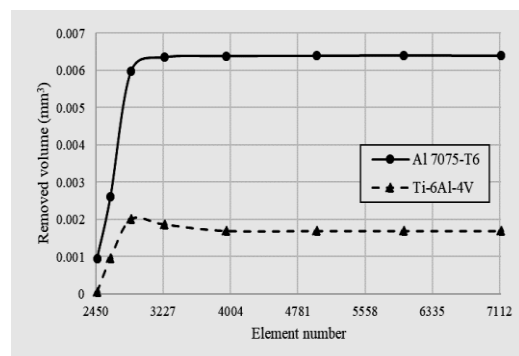


شکل (۸): اعتبارسنجی شبیه‌سازی المان محدود حاضر با معادلات تحلیلی رایج در فرسایش.



شکل (۶): شبیه‌سازی المان محدود بعد از حذف ماده.

بر اساس شکل ۷، بررسی حساسیت شبکه‌بندی برای پنج ذره برخوردکننده به قطر ۱۰۰ میکرون با زاویه برخورد ۳۰ درجه و سرعت برخورد ۷۵ متر بر ثانیه، ۳۲۴۰ المان را برای رسیدن به پاسخ قابل اطمینان در آلیاژ Al 7075-T6 نشان می‌دهد. این در حالی است که ۳۹۵۲ المان برای رسیدن به چنین پاسخی در آلیاژ Ti-6Al-4V نیاز است. بنابراین به منظور ایجاد شرایط یکسان در همه حالات، ۳۹۵۲ المان مدنظر قرار گرفت. این بررسی برای همگرایی نتایج در زوایای برخوردی ۲۰ تا ۴۰ (با گام ۵ درجه) درجه سرعت‌های ۶۵ و ۸۵ متر بر ثانیه نیز تکرار گردید که تعداد المان ۳۹۵۲ را تأیید نمود.



شکل (۷): بررسی حساسیت شبکه‌بندی برای ذرات برخوردکننده با زاویه ۳۰ درجه و سرعت ۷۵ متر بر ثانیه.

۴- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از دقت و صحت شبیه‌سازی المان محدود، مطابق آنچه التبیگی و همکارانش [۳] ارائه نموده‌اند، سه گلوله‌ی کروی فولادی با قطر ۵۰۰ میکرون و سرعت

۵- نتایج و بحث

اثر سرعت ذرات برخوردکننده و زاویه برخورد ذرات مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرسایش سطوح می‌باشند [۳۹]. تحقیق حاضر، اثر این دو عامل را بر نرخ فرسایش حاصل از برخورد ذرات چندگانه آلومینا به سطح آلیاژ Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V بررسی نموده است. مطابق آنچه در بخش ۳ مورد بحث قرار گرفت، در تمام تحلیل‌ها به منظور در نظر گرفتن اثر برخورد ذرات چندگانه، پنج ذره آلومینا به صورت متوالی به یک مکان از RVE برخورد داده شدند.

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 (ε) را به طور عمومی می‌توان به صورت رابطه (δ) نشان داد [۴۰]:

$$\varepsilon = E^d f(\alpha) B \quad (5)$$

که در آن، E معرف انرژی جنبشی ذره، d توان انرژی جنبشی، $f(\alpha)$ تابع وابستگی نرخ فرسایش به زاویه برخورد و B یک مقدار ثابت می‌باشد. با توجه به این که رابطه انرژی جنبشی ذرات و سرعت آن‌ها به صورت توانی از 2 ($E \propto v^2$) می‌باشد، مطابق رابطه (6) می‌توان انتظار داشت که بین نرخ فرسایش و سرعت ذرات، رابطه‌ای توانی با مقدار توان نامشخص برقرار باشد:

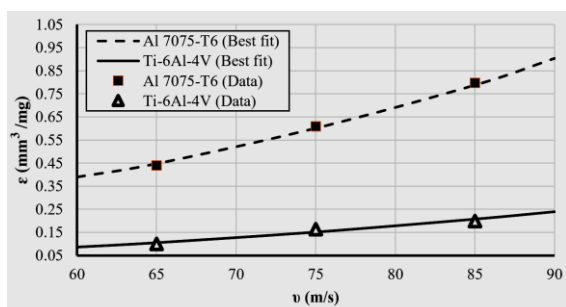
$$\varepsilon \propto v^n \quad (6)$$

بنابراین، اولین عامل مورد بررسی، اثر سرعت ذرات برخوردکننده بر نرخ فرسایش و استخراج توان سرعت برای آلیاژهای مدنظر می‌باشد. 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.

فینی [۶] و بیتر [۳۵ و ۳۶] در بررسی‌های تحلیلی و تجربی خود سرعت را به عنوان یک عامل کلیدی مؤثر بر فرسایش در نظر گرفته و در معادلات تحلیلی خود برای توان سرعت، عدد ۲ را پیشنهاد نمودند. هیش [۳۷] با اصلاح فرضیات ساده‌شونده آن‌ها این مقدار را ۲/۵ گزارش

نمود. سانداراراجان و شیومن [۴۱] دریافتند که به‌طور کلی برای مواد نرم، توان سرعت بین ۲ تا ۳/۳ با یک مقدار میانگین ۲/۵۵ تغییر می‌کند. یراماردی و بهادر [۲۰] نیز مقدار ۲/۳۵ را به‌صورت تجربی و التبگی و همکارانش [۳] به طور خاص مقدار ۲/۲۵۲۵ را برای آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود گزارش کردند.

در شکل ۹ بهترین خط گذرنده از نقاط به‌دست‌آمده از ارتباط بین نرخ فرسایش و سرعت به ترتیب برای آلیاژ Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V ترسیم و بر اساس آن مقدار توان محاسبه شده است. مقدار توان برای این دو آلیاژ به ترتیب ۲/۱۰۹۱ و ۲/۵۰۰۰ به‌دست آمد.



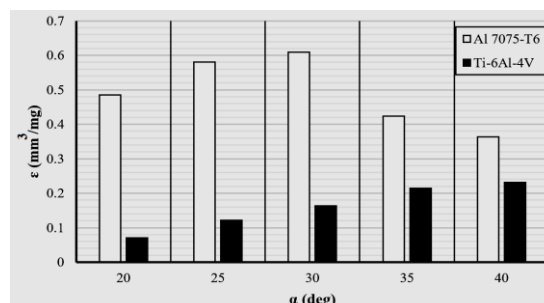
شکل (۹): اثر سرعت ذره بر نرخ فرسایش

آلیاژهای Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V

مطابق آنچه دربارۀ فرسایش مواد نرم در بخش ۱ بیان شد، انتظار می‌رود حداکثر نرخ فرسایش برای آلیاژهای Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V در زوایای برخوردی پایین (بین ۲۰ تا ۴۰ درجه) اتفاق بیفتد. به‌منظور بررسی اثر زاویه ذرات برخوردکننده بر نرخ فرسایش، ذرات با قطر ۱۰۰ میکرون و با سرعت ۷۵ متر بر ثانیه در محدوده زوایای ۲۰ تا ۴۰ و با گام زاویه ۵ درجه به سطح هدف اصابت نمودند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در آلیاژ Al 7075-T6 با افزایش زاویه برخوردی، نرخ فرسایش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. حداکثر نرخ فرسایش برای این آلیاژ در زاویه برخوردی ۳۰ درجه ثبت شده است. در مقابل، برای آلیاژ Ti-6Al-4V با افزایش زاویه برخورد ذرات، نرخ فرسایش افزایش یافته و بیشترین نرخ فرسایش در زاویه برخوردی ۴۰ درجه ثبت شده است. این نتیجه با نتایج تجربی گزارش‌شده توسط عباس و همکاران [۴۲]، خدای و همکاران [۲۵] و یراماردی و همکاران [۲۰] نیز انطباق

- Bousser, E., Martinu, L., and Klemberg-Sapie, J. E. "Solid Particle Erosion Mechanisms of Protective Coatings for Aerospace Applications", Surf. Coat. Technol. Vol. 257, pp.165-181, 2014.
- ElTobgy, M., Ng, E., and Elbestawi, M. "Finite Element Modeling of Erosive Wear", Int. J. Mach. Tools. Manuf. Vol. 45, No. 11, pp.1337-1346, 2005.
- Wang, Y. F., and Yang, Z. G. "Finite Element Model of Erosive Wear on Ductile and Brittle Materials", Wear. Vol. 265, pp.871-878, 2008.
- I.R.Iran Civil Aviation Organization, "Accidents"; <https://www.cao.ir/web/accidents/reports>, 2018 (In Persian).
- Finnie, I. "Erosion of Surfaces by Solid Particles", Wear. Vol. 3, No. 2, pp.87-103, 1960.
- Dursun, T., and Costas, S. "Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys", Mater. Des. Vol. 56, pp.862-871, 2014.
- Starke Jr, E. A., and Staley, J. T. "Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft", Prog. Aerosp. Sci. Vol. 32, No. 2-3, pp.131-172, 1996.
- Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H., and Leyens, C. "Titanium Alloys for Aerospace Applications", Adv. Eng. Mater. Vol. 5, No. 6, pp.419-427, 2003.
- Boyer, R. R. "Applications of Beta Titanium Alloys in Airframes", Miner. Met. and Mater. Soc. (USA). pp.335-346, 1993.
- Boyer, R. R., and Briggs, R. D. "The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry", J. Mater. Eng. Perfor. Vol. 14, No. 6, pp.681-685, 2005.
- Oliveira, V., Vazquez, A., Aguiar, C., Robin, A., and Barboza, M. "Nitride Coatings Improve Ti-6Al-4V Alloy Behavior in Creep Tests", Mat. Sci. Eng. A. Vol. 670, pp.357-368, 2016.
- Bielawski, M., Beres, W. "FE Modelling of Surface Stresses in Erosion-resistant Coatings under Single Particle Impact", Wear. Vol. 262, No. 1, pp.167-175, 2007.
- Elalem, K., and Li, D. "Dynamical Simulation of an Abrasive Wear Process", J. Comput-Aided Mat. Des. Vol. 6, pp.185-193, 1999.
- Griffin, D., Daadbin, A., and Datta, S. "The Development of a Three-dimensional Finite Element Model for Solid Particle Erosion on an Alumina Scale/MA956 Substrate", Wear. Vol. 256, No. 9, pp.900-906, 2004.

مناسبی دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین نرخ فرسایش آلیاژ Al 7075-T6 بیش از ۲/۶ برابر بزرگتر از بیشترین نرخ فرسایش ثبت شده برای آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد.



شکل (۱۰): اثر زاویه برخورد ذرات بر نرخ فرسایش آلیاژهای Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک روش المان محدود برای شبیه‌سازی سه‌بعدی فرسایش آلیاژهای Al 7075-T6 و Ti-6Al-4V در اثر برخورد ذرات چندگانه با استفاده از روش RVE ارائه گردید. این شبیه‌سازی مبتنی بر معادلات ساختاری جانسون - کوک انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت ذرات فرساینده با نرخ فرسایش، یک رابطه توانی دارد که مقدار توان این رابطه برای آلیاژ Al 7075-T6 برابر ۲/۱۰۹۱ و برای آلیاژ Ti-6Al-4V برابر ۲/۵۰۰۰ می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش سرعت ذرات در هنگام برخورد با آلیاژ Ti-6Al-4V، نرخ فرسایش را با شدت بیشتری نسبت به مورد مشابه در آلیاژ Al 7075-T6 تغییر می‌دهد. نتایج نشان داد که برای محدوده زوایای برخوردی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه، بیشترین نرخ فرسایش برای آلیاژهای تیتانیومی و آلومینیومی، به ترتیب در زاویه برخوردی ۴۰ و ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد. هم‌چنین حداکثر نرخ فرسایش آلیاژ Al 7075-T6 بیش از ۲/۶ برابر، بیشتر از حداکثر نرخ فرسایش ثبت شده برای آلیاژ Ti-6Al-4V است. این نتیجه بدان معناست که مقاومت آلیاژ Ti-6Al-4V در برابر فرسایش ذرات جامد، به مراتب بیشتر از آلیاژ Al 7075-T6 می‌باشد.

۷- مراجع

- Farahani, H., Ketabchi, M., and Zangeneh, S. "Determination of Johnson-Cook Plasticity Model Parameters for Inconel718", J. Mater. Eng. Perfor. Vol. 26, pp.5284-5293, 2017.

- Impingement Using Gas Jets”, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2004.
27. ASTM D968 -17. “Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Organic Coatings by Falling Abrasive”, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
 28. V. Swaminathan, and J. Smith. “Program on Technology Innovation: State-of-Knowledge Review of Erosion-resistant Coatings for Steam and Gas Turbine Applications”, EPRI, California, 2008.
 29. Johnson, G. R., and Cook, W. H. “Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures”, Eng. Fract. Mech. Vol. 21, pp.31-48, 1985.
 30. Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D., and Nayak, N. “Determination of Johnson Cook Material and Failure Model Constants and Numerical Modelling of Charpy Impact Test of Armour Steel”, Mat. Sci. Eng. A. Vol. 640, pp.200-209, 2015.
 31. Feli. S., and Bakhtiar, M. “Determination of Pressure stress of Metals Based on Taylor Impact Test”, J Aerospace Mechanics, Vol. 8, No. 1, 2012 (In Persian).
 32. Kang, P., Youn, S. K., and Lim, J. H., “Modification of the Critical Projectile Diameter of Honeycomb Sandwich Panel Considering the Channeling Effect in Hypervelocity Impact”, Aerospace Sci. Tech. Vol. 29, No. 1, pp.413-425, 2013.
 33. Wang, X., and Shi, J. “Validation of Johnson-Cook Plasticity and Damage Model Using Impact Experiment”, Int. J. Impact Eng. Vol. 60, pp.67-75, 2013.
 34. Brar, N. S., V. S. Joshi, and Harris, B. W. “Constitutive Model Constants for Al7075- T651 and Al7075- T6”, AIP Conf. Proc. Vol. 1195, No. 1, pp.945-948, 2009.
 35. Bitter, J. “A Study of Erosion Phenomena part I”, Wear. Vol. 6, No. 1, pp.5-21, 1963.
 36. Bitter, J. “A Study of Erosion Phenomena: Part II”, Wear. Vol. 6, No. 3, pp.169-190, 1963.
 37. Hashish, M. “An Improved Model of Erosion by Solid Particle Impact”; Seventh Int. Conf. Erosion Liquid Solid Impact. Cambridge, England, 1987.
 38. Rajahram, S. S. “Erosion - corrosion mechanisms of stainless steel UNS S31603”, PhD
 16. Takaffoli, M., and Papini, M. “Numerical Simulation of Solid Particle Impacts on Al6061-T6 part I: Three-dimensional Representation of Angular Particles”, Wear. Vol. 292, pp.100-110, 2012.
 17. Takaffoli, M., and Papini, M. “Numerical Simulation of Solid Particle Impacts on Al6061-T6 Part II: Materials Removal Mechanisms for Impact of Multiple Angular Particles”, Wear. Vol. 296, No. 1-2, pp.648-655, 2012.
 18. Algahtani, A., Neville, A., Shrestha, S., and Liskiewicz, T. “Erosion Resistance of Surface Engineered 6000 Series Aluminium Alloy”, Proc. Inst. Mech. Eng. J. Vol. 227, No. 11, pp.1204-1214, 2013.
 19. Arabnejad, H., Mansouri, A., Shirazi, S. A., and McLaury, B. S. “Development of Mechanistic Erosion Equation for Solid Particles”, Wear. Vol. 332, pp.1044-1050, 2015.
 20. Yerramareddy, S., and Bahadur, S. “Effect of Operational Variables, Microstructure and Mechanical Properties on the Erosion of Ti-6Al-4V”, Wear. Vol. 142, pp.253-263, 1991.
 21. Winkelmann, H., Varga, M., Badisch, E., and Danning, H. “Wear Mechanisms at High Temperatures: Part 2: Temperature Effect on Wear Mechanisms in the Erosion Test”, Tribol. Lett. Vol. 34, No. 3, pp.167-175, 2009.
 22. Avcu, E., Fidan, S., Yıldıran, Y., and Sınmazçelik, T. “Solid Particle Erosion Behaviour of Ti6Al4V Alloy”, Tribol.-Mater. Surf. Interfaces. Vol. 7. No. 4, pp.201-210, 2013.
 23. Atroshenko, S. A., Evstifeev, A. D., Kazarinov, N. A., Petrov, Y. V., and Valiev, R. Z. “Behavior of the Grade 5 Titanium Alloy in Different Structural States in Conditions of High-Speed Erosion”, Procedia Struct. Integr. Vol. 6, pp.190-195, 2017.
 24. Naveed, M., Schlag, H., König, F., and Weiß, S. “Influence of the Erodent Shape on the Erosion Behavior of Ductile and Brittle Materials”, Tribol. Lett., Vol. 65, No. 1, p.18, 2017.
 25. Khoddami, A. S., Salimi-Majd, D., and Mohammadi, B. “Finite Element and Experimental Investigation of Multiple Solid Particle Erosion on Ti-6Al-4V Titanium Alloy Coated by Multilayer Wear-Resistant Coating”, Surf. Coat. Technol. Vol. 372, pp. 173-189, 2019.
 26. ASTM G76-04. “Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle

41. Sundararajan, G., and Shewmon, P. "A New Model for the Erosion of Metals at Normal Incidence", *Wear*. Vol. 84, pp.237-258, 1983.
42. Abbass, M. K., Abdulrahman, S. A., and Habeeb, H. M. "Study of Erosion-Corrosion and Electrochemical Corrosion in Some Aluminum Alloys (Al 2024T3 and Al 7075T6)", *Int. J. Energy Environ.* Vol. 8, No. 6, pp. 545-556, 2017.
39. Grewal, H. S., Anupam A., and Singh, H. "Identifying Erosion Mechanism: A Novel Approach", *Tribol. Lett.* Vol. 51, No. 1, pp.1-7, 2013.
40. Wood, R. "The Sand Erosion Performance of Coatings", *Mater. Des.* Vol. 20, No. 4, pp.179-191, 1999.