



Numerical and Experimental Investigation of Correlation between Wear and Temperature in Dry Sliding of Polyethylene-Zinc Oxide Nanocomposite

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Najafi A.¹ MSc,
Khoddami A.M.¹ MSc,
Akbarzadeh S.^{*1} PhD

How to cite this article

Najafi A, Khoddami A.M, Akbarzadeh S. Numerical and Experimental Investigation of Correlation between Wear and Temperature in Dry Sliding of Polyethylene-Zinc Oxide Nanocomposite. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2547-2558.

¹Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, P.O.B. 84156-83111.

Phone: -

Fax: -

s.akbarzadeh@iut.ac.ir

Article History

Received: March 2, 2020

Accepted: August 23, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

Nowadays, many attempts have been made to replace conventional materials with polymers which have the advantage of having less weight and higher formability. Polymers besides these advantages have some shortcomings. One method to overcome these shortcomings is to strengthen them by adding other materials to polymers. As an example, polymer nanocomposites are made by adding nanoparticles to polymers to enhance their tribological performance. In this paper, an experimental and numerical study on the correlation between temperature rise and the wear rate in the polyethylene (PE) with 10% ZnO nanoparticles has been investigated. A comparison between pure PE and polymer nanocomposite has been made. A 3D finite element model has been developed in Abaqus to study the wear in the contact of pin and the disk. The results predicted by the FE model are compared to the experimental data obtained in this research using the pin on disk test rig. According to the results, a non-linear relation between temperature changes and wear rate has been developed.

Keywords Nanocomposite; Polyethylene; Zinc Oxide; Wear Resistance; Temperature

CITATION LINKS

[1] Friction and wear of materials [2] Wear resistance [3] Advanced thermally assisted surface engineering processes [4] A review on the application of Trombe wall system ... [5] Thermal and thermomechanical effects in dry sliding [6] Contact surface temperature models for finite bodies in dry and boundary lubricated sliding [7] Simulating sliding wear with finite element method [8] Finite element simulation of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration [9] Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc [10] Finite-element heat-transfer analysis of a PEEK-steel sliding pair in a pin-on-disc configuration [11] Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks [12] On the relationship between wear and thermal response in sliding systems [13] On the correlation between wear and entropy in dry sliding contact [14] Prediction of wear in reciprocating dry sliding via dissipated energy and temperature rise [15] An application of dimensional analysis to entropy-wear relationship [16] Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting [17] Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir process and investigating its microstructural, mechanical and wear properties [18] Experimental simulation of the friction, temperature, and wear distributions for polyamide-steel gear contact using twin-disc setup [19] Application of a thermodynamically based wear estimation methodology [20] Wear rate and entropy generation sources in a Ti6Al4V-WC/10Co sliding pair [21] Numerical and experimental investigation of wear in nanostructured tin coating on steel substrate [22] Numerical and experimental study of the wear behavior of Polyethylene/ZnO nanocomposite [23] Metal forming: mechanics and metallurgy

بررسی عددی و تجربی ارتباط بین سایش و دما در لغزش خشک نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی

علی نجفی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

امیرسجاد خدای PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

صالح اکبرزاده PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در جهان امروز تلاش‌های فراوانی به منظور جایگزین کردن پلیمرها با مواد متداول صورت گرفته که موجب فرآیندپذیری بهتر و کاهش وزن محصولات تولیدشده به‌وسیله آنها شده است. پلیمرها در کنار این مزایا، معایبی نیز دارند. یکی از روش‌های مقابله با این معایب، تقویت پلیمرها از طریق اضافه کردن دیگر مواد به آنها است. به‌عنوان نمونه، می‌توان به نانوکامپوزیت‌های پلیمری تولیدشده از طریق اضافه کردن نانوذرات به پلیمر به‌منظور افزایش عملکرد سوده‌شناسی آن اشاره نمود. در این مقاله یک مطالعه تجربی و عددی بر روی ارتباط بین افزایش دما و نرخ سایش در پلی اتیلن با ۱۰ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی انجام شده است. همچنین پلی اتیلن خالص با نانوکامپوزیت پلیمری نیز از این منظر مورد مقایسه با یکدیگر قرار گرفتند. یک مدل المان محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس به‌منظور مطالعه سایش در تماس بین و دیسک توسعه داده شده است. نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل المان محدود با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش پین روی دیسک با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مطابق نتایج، یک رابطه غیرخطی بین تغییرات دما و نرخ سایش ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: نانوکامپوزیت، پلی اتیلن، اکسید روی، مقاومت سایشی، دما

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲

نویسنده مسئول: s.akbarzadeh@iut.ac.ir

مقدمه

سایش، حذف یا تغییر شکل مواد روی سطح، ناشی از برهم‌کنش‌ها در تماس مکانیکی دو سطح است [1]. از مواردی که سایش در آنها دارای اهمیت است، می‌توان به برخی اعضای بدن مانند مفاصل زانو و مهره‌های ستون فقرات، قطعات مختلف لغزشی و غلتشی در اتومبیل‌ها، تماس تایر خودرو با جاده و قطار با ریل خطوط راه‌آهن اشاره نمود. عوامل متعددی بر سایش موثر است. علاوه بر خواص ذاتی ماده، شرایط محیطی و تریبوسیستمی نیز در میزان سایش تأثیرگذار هستند. عوامل کلیدی موثر بر سایش شامل متغیرهای متالورژیکی نظیر سختی، چقرمگی، ساختار میکروسکوپی و ترکیب شیمیایی، متغیرهای سیستم نظیر مواد در حال تماس (مثل ساینده‌ها و مشخصات آنها)، نوع و روش بارگذاری، سرعت، دما، زمان، زبری سطح، روانکاری و خوردگی هستند [2].

به‌طور کلی در فرآیندهای مکانیکی و کاربردی، سه مرحله را می‌توان برای سایش در نظر گرفت [3]:

۱- مرحله اول که در آن دو سطح در مجاورت هم قرار گرفته و تماس اولیه شکل می‌گیرد. در این مرحله نرخ سایش می‌تواند کم یا زیاد باشد.

۲- مرحله دوم یا مرحله پایدار که در آن سایش با نرخ ثابتی انجام می‌شود. بیشترین عمر کاری ماده در این مرحله است.

۳- مرحله سوم یا نهایی که در این مرحله به‌دلیل کاهش مقاومت به سایش ماده ناشی از مراحل قبل، نرخ سایش بالا بوده و ماده به سرعت دچار آسیب و از کارافتادگی می‌شود.

تماس دو جسم جامد با یکدیگر، منجر به ایجاد اصطکاک و در نتیجه افزایش دما به‌صورت موضعی بین دو جسم می‌شود. بررسی ارتباط بین دمای حاصل از سایش می‌تواند به فهم بهتر این پدیده کمک کند. همچنین در صورتی که بتوان دمای ناشی از سایش را به‌خوبی تعیین نمود، با استفاده از مفهوم آنتروپی و ارتباط آن با مدل‌های آسیب می‌توان پیش‌بینی مناسبی از آسیب ناشی از سایش به عمل آورد. بنابراین تمرکز بر روی دمای ایجادشده بر اثر سایش می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

کندی [4] از یک تحلیل المان محدود به‌منظور پیش‌بینی دمای سطح ناشی از اصطکاک در سیستم‌های لغزشی استفاده نمود. این تحلیل تأثیر سرعت لغزش بر درجه حرارت تولیدی به‌ویژه در سرعت‌های لغزشی بالا را در نظر می‌گرفت. تطابق خوبی بین پیش‌بینی او بر مبنای برنامه المان محدود و نتایج تجربی درجه حرارت مشاهده شد. نتایج کار کندی نشان داد که پیش‌بینی درجه حرارت به‌صورت قابل توجهی وابسته به سرعت لغزشی اجزا، حتی در سرعت لغزشی پایین است. برنامه المان محدود ارایه‌شده توسط او برای مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف مواد بر درجه حرارت سطح در سیستم‌های لغزشی به‌کار برده شد. کندی [5] مفاهیم مربوط به تولید حرارت بر اثر لغزش خشک را توسعه داد. او معتقد بود که این حرارت ایجادشده می‌تواند بر روی ادامه فرآیند سایش مواد موثر باشد؛ بنابراین بررسی، اندازه‌گیری و ایجاد ارتباط بین نرخ سایش مواد جامد و افزایش دمای موضعی ناشی از آن دارای اهمیت است. او بر روی تنش‌های حرارتی موضعی ناشی از افزایش دما در محل سایش، مفاهیم ترمودینامیکی و حرارتی مرتبط با سایش و نحوه توزیع دما در اطراف محل سایش بحث و بررسی انجام داد؛ با این حال روش قانون مند عددی، تحلیلی و یا آزمایشگاهی برای رسیدن به این هدف ارایه نکرد. تیان و کندی [6] مدلی را برای تعیین درجه حرارت سطح تماس در سیستم‌های لغزشی خشک و روان‌شده مرزی پیشنهاد کردند. آنها نشان دادند که فرآیند پیش‌بینی درجه حرارت سطح در دو مرحله مجزای پیش‌بینی افزایش درجه حرارت موضعی سطح در یکی از دو نقطه تماسی، با استفاده از مدل کلاسیک بلاک برای جسم نیمه‌محدود و پیش‌بینی افزایش درجه حرارت اسمی سطح با توجه به محدودیت مقیاس بالای جریان گرما، انجام می‌شود. مدل مذکور برای مطالعه

حلقه برای دو مجموعه ماده برنز روی فولاد ۴۱۴۰ و برنج روی فولاد ۴۱۴۰ بررسی شد. این بررسی نشان داد که دما در فصل مشترک می‌تواند به‌صورت موثری برای توصیف رفتار سیستم لغزشی در شرایط سایش حالت پایدار مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تجربی پژوهش مذکور نشان داد که یک ارتباط خطی بین نرخ سایش و دما برای مجموعه مواد مورد نظر وجود دارد. /قدم و خوانساری^[13] نیز به بررسی ارتباط بین سایش و آنتروپی در تماس لغزشی خشک پرداختند. آنها از نظریه بازگشت‌ناپذیری آنتروپی در ترمودینامیک برای مطالعه نرخ سایش و ارتباط آن با فرآیند آسیب در یک سیستم لغزش خشک استفاده کردند. در این تحقیق نشان داده شد که نرخ سایش به‌طور خطی با نرخ جریان آنتروپی در ارتباط است. آنها در پژوهشی دیگر مدلی را برای شرایطی که امکان اندازه‌گیری مستقیم حرارت اتلاف‌شده ناشی از سایش وجود ندارد، توسعه دادند. یک مدل المان محدود متقارن را برای لغزش پین‌های برنجی و دیسک‌هایی از جنس SAE 4140 توسعه دادند که افزایش دمای ناشی از سایش را به‌عنوان خروجی ارائه می‌نمود. سپس با استفاده از آزمایش‌های پین روی دیسک، ارتباط بین نرخ سایش، اتلاف انرژی و افزایش دمای موضعی محل سایش را تعیین کرده و به اثبات کارآمدی تحلیل‌های المان محدود خود پرداختند. این دو پژوهشگر نشان دادند که یک ارتباط خطی قوی بین نرخ سایش و انرژی اتلاف‌شده وجود دارد؛ بنابراین در شرایطی که امکان اندازه‌گیری یا محاسبه انرژی تلف‌شده بر اثر سایش وجود ندارد، با اندازه‌گیری تغییرات جرم ماده و محاسبه نرخ سایش، می‌توان انرژی تلف‌شده را نیز محاسبه نمود^[14]. علی‌رغم اینکه کار آنها بسیار ارزشمند بود، اما به نظر می‌رسد که ضرایب معادله برای هر ماده متفاوت بوده و امکان تعمیم نتایج آنها برای همه مواد وجود نداشته باشد. به‌طور خاص، رابطه خطی معرفی‌شده برای لغزش سایر مواد، از جمله کامپوزیت‌ها، پلیمرها و سرامیک‌ها اساساً محل سوال و ابهام است. /میری و همکاران^[15] در ادامه بررسی خطی بودن اثر دمای ناشی از سایش، آنالیز ابعادی بوکینگهام را در تماس لغزشی خشک مورد استفاده قرار دادند تا ارتباط بین سایش و نرخ جریان آنتروپی مشخص شود. گروه‌های بی‌بعد با استفاده از نتایج تجربی به یکدیگر ارتباط داده شدند که این نتایج مربوط به آزمایش‌های سایش در تماس لغزشی دیسک بر روی دیسک برای دو مجموعه از مواد یعنی برنز روی فولاد ۴۱۴۰ و برنج روی فولاد ۴۱۴۰ است. آنالیز ابعادی، ارتباط بین هفت متغیر سوده‌شناسی، شامل نرخ سایش، دما، ضریب اصطکاک، نرخ جریان آنتروپی، سختی، نیروی عمودی و سرعت لغزش را شامل شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که جریان آنتروپی می‌تواند به‌طور موثری رفتار سیستم لغزشی را در طول شرایط سایش حالت پایدار توصیف کند. کندی و همکاران^[16] با بررسی دما در سطح تماس، تأثیر آن را بر سایش در آزمایش پین روی دیسک مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها پیش‌بینی بیشینه دمای ایجادشده در سطح تماس در آزمایش پین روی دیسک برای شرایط خشک و

درجه حرارت سطوح تحت لغزش در اجسام با ضخامت کم و در مواردی که ناحیه تماسی به‌صورت تکراری مسیر مشخصی را طی می‌کند، مفید است.

بودا و /ندرسون^[7] به شبیه‌سازی سایش لغزشی با استفاده از روش‌های مرسوم المان محدود پرداختند. در این بررسی از نرم‌افزار المان محدود انسیس برای شبیه‌سازی سایش استفاده شده است. در شبیه‌سازی آنها از قانون سایش خطی استفاده شده و تماس بین دو فولاد بدون روانکاری و در حالت پین روی دیسک مورد تحلیل عددی و تجربی قرار گرفته است. مدل‌های به‌کاررفته همگی دوبعدی و متقارن محوری فرض شده‌اند. اساس کار آنها مدل‌سازی پدیده سایش به روش عددی و بر مبنای معادله آچارد است. در تحقیق انجام‌شده، تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک، اثرات دمایی و تغییرات زبری سطح روی سطوح در تماس، در نظر گرفته نشد. با این حال کار آنها دارای نتایج قابل قبولی نسبت به نتایج تجربی بود.

بن‌عبدالله و /ندر^[8] به مدل‌سازی المان محدود سایش پلی‌اکسی‌اتیلن در نرم‌افزار انسیس پرداختند. تغییرات ناشی از سایش در سطح با صرف نظر از تغییرات موضعی دما و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مذکور در محدوده سرعت‌ها و نیروهای کم به‌خوبی با نتایج تجربی انطباق نشان داده است. یان و همکاران^[9] سایش ناشی از حرکت پین روی دیسک چرخان را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها در مدل‌سازی خود فرض کردند که شرط تنش صفحه‌ای به‌صورت غالب در مرکز مسیر سایش دیسک وجود دارد و با توجه به این فرض به مدل‌سازی دوبعدی دینامیکی پرداختند. سپس نتایج دوبعدی را در یک فاکتور انتقال که مربوط به شکل مسیر سایش است، ضرب نمودند تا به حالت سه‌بعدی تعمیم داده شود. در این مدل‌سازی، پین از جنس کاربید تنگستن و دیسک با پوشش آلومینیوم سیلیسیم در نظر گرفته شده است. کنیا و همکاران^[10] از یک تحلیل المان محدود به‌منظور بررسی انتقال حرارت در تماس لغزشی پلی‌اترترکتون با فولاد در حالت پین روی دیسک استفاده کردند. در این بررسی، مدل المان محدود حرارتی برای مطالعه توزیع درجه حرارت در تماس لغزشی پین از جنس پلی‌اترترکتون بر روی دیسک فولادی به‌کار گرفته شد. /ژانگ و همکاران^[11] به بررسی خواص سوده‌شناسی (Tribology) کامپوزیت‌های دارای فایبرهای کوتاه با استفاده از شبکه عصبی مجازی پرداختند. آنها با استفاده از شبکه عصبی مجازی به پیش‌بینی نرخ سایش و ضریب اصطکاک در کامپوزیت پلی‌آمید ۴/۶ تقویت‌شده با فایبرهای کوتاه پرداختند.

/میری و همکاران^[12] ارتباط بین سایش و افزایش درجه حرارت را در سیستم‌های تحت لغزش بررسی کردند. آنها یک روش نیمه‌تجربی برای تعیین ضریب سایش بر پایه پاسخ حرارتی سیستم لغزشی ارائه نمودند. در این تحقیق با استفاده از نتایج تجربی، ارتباط بین دما و نرخ سایش در حرکت لغزشی حلقه روی

پوشش‌های نانوساختار تیتانیوم‌نیتريد بر بستر فولادی پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش پین روی دیسک، نتایج شبیه‌سازی خود در نرم‌افزار آباکوس را اعتبارسنجی نموده و نشان دادند که بین نرخ سایش و تغییرات دما برای پوشش سرامیکی مذکور، یک رابطه خطی وجود دارد. بنابراین یک پوشش سرامیکی نانوساختار نیز رفتار مواد نرم و آلیاژهای فلزی را تکرار نمود و این پژوهش یک گام رو به جلو در تعمیم قواعد بیان‌شده برای فلزات در سرامیک‌ها و مواد ترد به‌شمار می‌رود.

پلی‌اتیلن یکی از انواع ترموپلاستیک‌ها است که از طریق پلیمریزاسیون گاز اتیلن به‌دست می‌آید. این ماده دارای کاربردهای صنعتی گوناگونی از جمله لوله‌های انتقال آب، لوله‌های انتقال فاضلاب، لوله‌هایی با قابلیت خم‌شدن، اتصالات، تولید انواع لوازم پلیمری مورد استفاده در آشپزخانه و صنایع غذایی مانند کیسه‌های پلاستیکی و بسته‌بندی، ظروف شیر و مایعات، قوطی‌های مواد آرایشی و بهداشتی مانند قوطی شامپو، قوطی ریکا، قوطی انواع کرم‌ها و غیره است. علاوه بر موارد مذکور، کاربردهای پزشکی از پلی‌اتیلن نیز به ثبت رسیده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به کاربرد این ماده در ساخت قوزک در مفصل زانو اشاره کرد که از این حیث می‌توان اهمیت مساله سایش در این ماده را بررسی نمود. به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به سایش پلی‌اتیلن از نانوذرات اکسید روی استفاده می‌شود. اکسید روی ترکیبی است که از گذشته به‌عنوان جاذب امواج ماورای بنفش به‌طور وسیعی در ترکیب‌های بهداشتی و آرایشی مورد استفاده قرار گرفته است.

در عمده تحقیقات انجام‌شده در این حوزه [12, 14, 19, 20]، رابطه بین دما و نرخ سایش برای فلزات مورد بررسی قرار گرفته و یک رابطه خطی برای آنها گزارش شده است. بر این اساس پرسشی که به‌وجود می‌آید، این است که آیا این ارتباط خطی بین دما و نرخ سایش برای پلیمرها نیز برقرار است. پژوهش حاضر علاوه بر بررسی این مساله، به مطالعه اثر نانوذرات تقویت‌کننده پلیمرها بر نحوه ارتباط دما با نرخ سایش نیز می‌پردازد و اثر آن در خطی‌سازی این ارتباط را بررسی می‌نماید. در ابتدا با استفاده از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک، مقاومت به سایش پلیمر خالص پلی‌اتیلن با نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در حین آزمون سایش، با استفاده از دوربین حرارتی، دمای نمونه‌ها ثبت شده و ارتباط بین نرخ سایش و دما از طریق داده‌های تجربی استخراج می‌شود. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Abaqus 6.14 مدل‌سازی المان محدود از فرآیند آزمون سایش انجام شده و پاسخ دمایی سیستم به آزمون سایش از طریق مدل‌سازی نیز ثبت می‌شود. مدل مذکور ابتدا تحت شرایط پژوهش نتایج مدل‌سازی /قدم و خوانساری [13] شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی انجام می‌پذیرد. سپس شرایط مدل المان محدود با شرایط آزمایش و برای نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن اکسید روی ۱۰ درصد وزنی نانوذره تنظیم و نتایج دمایی آن با

روانکاری‌شده مرزی بود. نتایج این روش با نتایج تحلیل المان محدود حرارتی و نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. این بررسی برای ارزیابی سایش در زیرکونیا، فولاد ضدزنگ و پلی‌اتیلن انجام شد؛ اما رفتار دمایی کاملی از سایش را برای مواد مذکور ارائه نکرد. احمدی‌فرد و همکاران [17] با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به تولید کامپوزیت سطحی زمینه‌فلزی بر روی سطح ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ با ذرات تقویت‌کننده اکسید تیتانیوم پرداخته و مقاومت به سایش این کامپوزیت را با فلز پایه خالص آن مقایسه نمودند. آنها بهبود مقاومت به سایش را به‌علت وجود ذرات تقویت‌کننده در زمینه که موجب ریزش دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی و در نتیجه افزایش میزان سختی می‌شود، دانستند. مبارک و همکاران [18] با انجام آزمایش دیسک روی دیسک، به بررسی ویژگی‌های توزیع دما و سایش در نواحی تماس بین دندان‌های یک چرخ‌دنده فولادی پلیمری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که سایش و اصطکاک به‌شدت به دمای ایجادشده در محل تماس بستگی دارد. آنها یک رابطه نسبتاً خطی برای ارتباط بین ضریب اصطکاک و دمای ایجادشده ارائه نمودند. /قدم و خوانساری [19] با به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر انرژی و آنتروپی به پیش‌بینی سایش در لغزش خشک بین سیلندرهای متقاطع پرداختند. آنها با روش‌های تجربی و اندازه‌گیری افزایش دما بر اثر اصطکاک، به ارتباط دمای ایجادشده و آنتروپی پرداختند. سپس با ایجاد ارتباط بین آنتروپی و مدل‌های آسیب، میزان سایش را پیش‌بینی نمودند. تمرکز آنها نیز بر خطی‌بودن ارتباط بین دما و نرخ سایش معطوف می‌شد. همچنین روابط مربوط به افزایش دمای موضعی و تولید حرارت در محل سایش را برای هندسه‌های دیگر نیز توسعه دادند. آنها با ارائه یک مدل المان محدود و متعاقب آن انجام آزمایش‌های سایش مربوطه، ارتباط بین انرژی اتلاف‌شده و نرخ سایش را در استوانه‌های متقاطع تحت سایش مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنها اگر چه نشان داد که ارتباط بین نرخ سایش و تغییرات دما یک ارتباط خطی است؛ اما این ابهام وجود داشت که آیا این همبستگی برای سایر مواد از جمله کامپوزیت‌ها، مواد ترد و پلیمرها هم صادق است. روداس و همکاران [20] ضمن ارائه یک مدل المان محدود در نرم‌افزار انسیس، به طراحی آزمایش پین روی دیسک برای مطالعه اثر اتلاف حرارت و افزایش دمای ناشی از سایش در یک فرآیند لغزش خشک پرداخته و متعاقباً تولید آنتروپی متأثر از اتلاف انرژی را مورد بررسی قرار دادند. دیسک‌هایی از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V و پین‌های تنگستن کاربرد مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نیز یک ارتباط خطی بین نرخ سایش آلیاژ تیتانیومی و تغییرات دما ارائه می‌داد. با اینکه از یک سرامیک به‌عنوان پین استفاده شده بود و سایش دیسک مورد بررسی قرار گرفته بود، عملاً درباره ارتباط بین نرخ سایش سرامیک و تغییرات دما گزارشی ارائه نشد و ابهامات در خصوص اثر جنس بر این ارتباط و همبستگی باقی ماند. نیکویی‌منش و /کبرزاده [21] به بررسی عددی و تجربی سایش در

نانوذرات اکسید روی از شرکت نانومواد رویین سازان تهیه شده است. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی نانوذرات اکسید روی تولیدی این شرکت نشان داده شده است.

جدول ۲) مشخصات فیزیکی نانوذرات اکسید روی

پارامتر	مقدار
خلوص (%)	۹۸/۷۲
اندازه ذرات (nm)	۲۰ تا ۶۰
فاز بلوری	ورتزیت
بسته بندی (g)	۳۰۰

برای تولید نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی، از روش مخلوط سازی مستقیم استفاده شده است. در این روش ابتدا پلی اتیلن که به صورت پودر تهیه شده را با نانوذرات اکسید روی درون یک ظرف مخلوط کرده و سپس مخلوط حاصل را درون یک اکسترودر دوماریچ (Twin Screw Extruders) قرار می دهند. باید توجه شود که اکسترودرهای تک مارپیچ در صنعت رایج بوده و بسیار مورد استفاده قرار می گیرد، اما برای مخلوط کردن ترکیب نانوکامپوزیت پودری بهتر است از اکسترودر دوماریچ استفاده شود؛ زیرا در این گونه اکسترودرها، به دلیل وجود دوماریچ، تنش برشی بیشتری به مخلوط مذاب وارد می شود. این تنش برشی مانع از کلوخه ای شدن نانوذرات شده و باعث چسبندگی بهتر پلیمر با نانوذرات می شود. برای این منظور مواد اولیه تهیه شد و در اختیار شرکت گیتی پسند سپهان قرار گرفت. در آزمایشگاه این شرکت با استفاده از دستگاه اکسترودر دوماریچ، نانوکامپوزیت اولیه با ۱۰ درصد وزنی نانوذره تولید شد. شکل ۱- الف، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه پلی اتیلن خالص و شکل ۱- ب نمونه نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی را نشان می دهد. مقایسه این دو شکل تغییرات ساختار پلیمر پیش و پس از اضافه شدن نانوذرات را نشان می دهد. همچنین با بزرگ نمایی در شکل ۱- ج، جانشانی یک نانوذره اکسید روی در بین ساختارهای پلیمری نشان داده شده است.

آزمون کشش ساده

به منظور استخراج خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تولید شده، نمونه هایی برای آزمایش کشش توسط دستگاه تزریق مدل HAIKING HXF88 با استفاده از نانوکامپوزیت تولید شده، آماده شد. قطعه تولید شده باید بعد از خروج از قالب بدون اعوجاج و تغییر شکل باشد که به این منظور تنظیمات دستگاه مطابق جدول ۳ اعمال شد. بر این اساس، مطابق شکل ۲ نمونه های نانوکامپوزیتی برای آزمون کشش آماده شدند.

به منظور استخراج خواص مکانیکی پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت های ساخته شده از قبیل مدول الاستیک، تنش تسلیم و استحکام کششی از دستگاه کشش شرکت ستام مدل STM-50 موجود در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شده است. آزمون کشش طبق استاندارد ASTM

نتایج دمایی به دست آمده از آزمون سایش مقایسه می شود. در انتها رابطه ای برای پیش بینی ارتباط بین تغییرات دما و نرخ سایش ارایه خواهد شد.

آزمایش

به طور کلی، علاوه بر روش های مدل سازی نرم افزاری، از دو طریق می توان مقاومت سایشی مواد را ارزیابی نمود:

۱- ارزیابی تجربی مقاومت سایشی مواد: روش های متعددی برای اندازه گیری نرخ سایش و اصطکاک وجود دارد. دستگاه های سایش پین بر روی دیسک، پین بر روی صفحه و حلقه بر روی حلقه تنها چند نمونه از متداول ترین ابزارهای آزمایشگاهی هستند که به منظور ارزیابی مقاومت سایشی و رفتار اصطکاکی مواد و روان کننده ها به کار گرفته و از رایج ترین روش های اندازه گیری نرخ سایش و اصطکاک به شمار می روند.

۲- ارزیابی تئوری مقاومت سایشی مواد: از گذشته تا به امروز رابطه های مختلفی برای تبیین سایش و میزان آن ارایه شده که در هر یک با توجه به دیدگاه مورد بررسی و مکانیزم سایشی غالب، پارامترها و فرم های متنوعی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مکانیزم سایشی بین نمونه ها سایش چسبان است، از مدل سایشی آرچارد (Archard Wear Equation) استفاده می شود. مدل سایشی آرچارد در واقع یک مدل ساده برای توصیف سایش چسبان بر پایه تئوری تماس ناهمواری ها است. بر اساس این معادله حجم مواد جدا شده در اثر سایش (W) در تماس بین دو جسم از رابطه ۱ به دست می آید [3].

$$W = K \frac{SN}{H} = \left(\frac{K}{H}\right) SN = kSN \quad (1)$$

که در این رابطه K ضریب سایش، S مسافت لغزش، N نیروی عمودی، H سختی ماده نرم تر در تماس و k نرخ سایش ویژه است.

از روش ارزیابی تجربی مقاومت سایشی مواد استفاده شده است.

آماده سازی کامپوزیت

از پلی اتیلن با چگالی بالا گونه ۵۲۵۱۸ تولیدی پتروشیمی جم استفاده شده است. فرم حاوی اطلاعات این پلی اتیلن که شامل خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آن است، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱) فرم اطلاعات پلی اتیلن با چگالی بالا ۵۲۵۱۸ پتروشیمی جم

پارامتر	روش آزمون	مقدار
چگالی (g/cm ³)	ASTM D1505	۰/۹۵۲
شاخص جریان مذاب (g/10min)	ASTM D1238	۱۸
مدول خمشی (MPa)	ASTM D790	۱۳۵۰
مقاومت ضربه ایزود، شکافته شده (J/m)	ASTM D256	۲۵
دمای نرم شدگی ویکت (°C)	ASTM D1525	۱۲۲

جدول ۴) خواص مکانیکی پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت پلی اتیلن روی اکسید ۱۰ درصد وزنی (اعداد برحسب پاسکال هستند)

ماده	مدول الاستیک	استحکام کششی
پلی اتیلن خالص	۱×۱۰ ^۹	۲/۹×۱۰ ^۷
نانوکامپوزیت	۱/۰۲۴×۱۰ ^۹	۴/۷۵×۱۰ ^۷

آزمون سایش

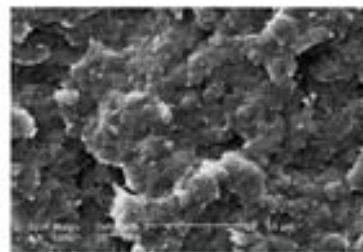
با توجه به امکانات موجود در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، به منظور مطالعه و ارزیابی رفتار سایشی از دستگاه پین بر روی دیسک استفاده شده است. در روش پین بر روی دیسک معمولاً یک پین که انتهای آن می تواند به صورت نیم کره و یا تخت باشد به یک بازو متصل بوده و به صورت ثابت در مقابل یک صفحه دوار قرار می گیرد. در شکل ۳ دستگاه آزمایش نشان داده شده است. در این دستگاه، بازوی ثابت به گونه ای طراحی شده که نه تنها نیروی اعمالی را تحمل نماید، بلکه انحراف آن به علت نیروی اصطکاک موجود بین پین و صفحه مقابل، قابل اندازه گیری باشد. در نتیجه با کالیبراسیون صحیح می توان ضریب اصطکاک بین دو قطعه در تماس با هم را اندازه گیری نمود. صفحه در این روش می تواند به صورت دیسک بوده و حرکت دورانی داشته و یا به صورت تخت بوده و حرکت رفت و برگشتی داشته باشد.



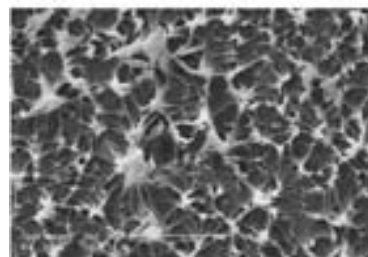
شکل ۳) دستگاه آزمون پین روی دیسک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

در آزمون سایش پین روی دیسک، معمولاً پین ثابت بوده و دیسک از جنس نمونه تحت آزمون در نظر گرفته می شود. با این حال، در مواردی که نمونه ها پلیمری باشند، اگر دیسک از جنس پلیمر باشد به دلیل سطح مقطع کم پین و اعمال فشار روی آن، پین داخل دیسک نفوذ کرده و مکانیزم از سایش به برخورد و نفوذ تغییر می نماید. در این حالت به جای سایش دیسک، تغییر شکل در آن ایجاد می شود. بنابراین در موارد این چنینی، دیسک را از جنس سخت تر (فلزی) و ثابت در نظر گرفته و نمونه ها که دارای سختی کمتری هستند را به صورت پین تولید می کنند.

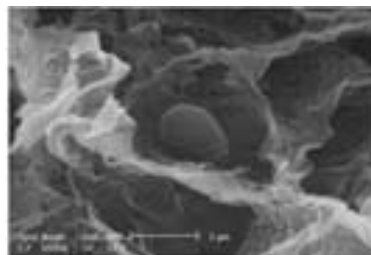
D638 انجام شد. جهت اطمینان از صحت نتایج، آزمون های کشش برای هر ماده، ۳ مرتبه تکرار شدند. جدول ۴ خواص مکانیکی پلیمر خالص پلی اتیلن و نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش نانوذرات به پلیمر خالص، مدول الاستیک و استحکام کششی بهبود یافته اند.



(الف)



(ب)

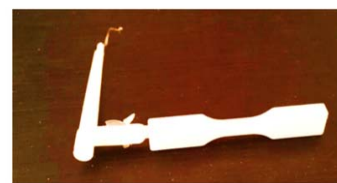


(ج)

شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از: الف) نمونه خالص، ب) نمونه با ۱۰ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی، ج) جانمایی نانوذره اکسید روی در ساختار پلیمر

جدول ۳) تنظیمات دستگاه تزریق برای آماده سازی قطعات آزمون کشش

پارامتر	مقدار
فشار تزریق (Bar)	۶۰
زمان تزریق (s)	۲
فشار نگهداری (Bar)	۷۰
زمان نگهداری (s)	۷
زمان خنک شدن (s)	۱۲



شکل ۲) نمونه های تولید شده برای آزمون کشش

۶۴/۵ سانتی‌متر است. برای بررسی میزان سایش در هر مرحله، کاهش جرم نمونه با استفاده از ترازویی با دقت ۰/۱ میلی‌گرم تعیین شد. نتایج تجربی با اعمال بار ۱۶ کیلوگرم روی پین و سرعت چرخشی ۱۰۰ دور بر دقیقه حاصل شده است. برای اندازه‌گیری دما، دوربین حرارتی مدل Testo 882 مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شدند و از نتایج میانگین‌گیری به عمل آمد.



شکل ۵) آماده‌سازی پین و دیسک بر روی دستگاه آزمون سایش

مدل سازی المان محدود

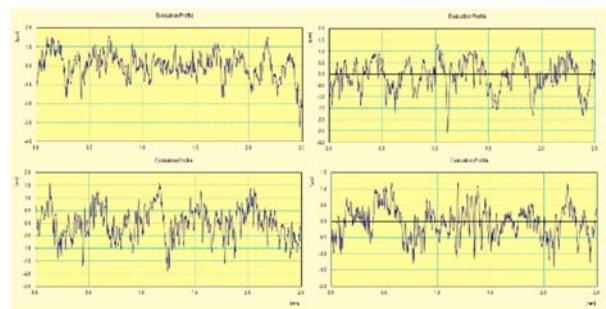
یک مدل المان محدود سه‌بعدی از فرآیند آزمون سایش در نرم‌افزار آباکوس آماده شد. شرایط مرزی در سطوح آزاد به صورت انتقال گرمای همرفتی با محیط در نظر گرفته شده است. در ضمن در قسمت زیرین مدل شرایط مرزی دما ثابت و برابر با دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد) اعمال شده است. دمای اولیه قطعه و محیط نیز با توجه به دمای آزمایش تجربی ۲۳ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است. در سطح تماس نیز شرط مرزی شار گرمایی در نظر گرفته شده است. مقدار این شار برابر با تقسیم توان اتلافی اندازه‌گیری شده بر سطح اسمی تماس به دست می‌آید. بین سطوح آزاد و هوا اثر انتقال حرارت همرفت در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال همرفت سطوح آزاد با هوا ۱۰ وات بر متر مربع بر کلون در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی با توجه به آزمون‌های تجربی، ۵۲۰۰ ثانیه است. مطابق مشاهدات تجربی، به دلیل ظرفیت گرمای حرارتی بالای نمونه‌ها (پین) و پایین بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی آن، گیرنده پین گرم نشده و در طول آزمایش و شبیه‌سازی دمای آن ثابت و برابر دمای اولیه آن فرض شده است. بررسی حساسیت شبکه‌بندی نشان می‌دهد که استفاده از تعداد ۴۸۳۲۶ المان برای مدل‌سازی مجموعه دستگاه آزمایش کافی است تا نتایج دمایی مستقل از شبکه‌بندی باشد. تقسیم المان‌ها به این صورت است که دیسک شامل ۵۷۶۰، پین شامل ۴۲۳۵، بخش نگه‌دارنده دیسک و پین به ترتیب شامل ۳۲۳۳۱ و ۶۰۰۰ المان است. شکل ۶ مدل مجموعه سایش مد نظر را نشان می‌دهد.

بر این اساس پین‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰ و طول ۴۰ میلی‌متر از جنس پلی‌اتیلن خالص و همچنین نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره آماده شد. سطح پین‌ها از طریق پولیش کاملاً تخت و صیقلی شد. برای تولید دیسک‌های آزمون سایش، ابتدا ۵۰ عدد دیسک از جنس ST37 به ضخامت ۷ میلی‌متر با دستگاه برش، تهیه شد. سپس با عملیات سنگ‌زنی مغناطیسی سطح آنها تخت و صیقلی شد؛ به گونه‌ای که تمام دیسک‌ها دارای زبری سطح یکسانی باشند. فرآیند انجام‌گرفته همچنین موجب می‌شود که دو سطح آن کاملاً با هم موازی و عمود بر محور دیسک شوند. در نهایت با عملیات سنگ‌زنی مغناطیسی، ضخامت دیسک‌های نهایی به ۶ میلی‌متر رسید. شکل ۴ نمونه‌ای از دیسک‌های مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴) دیسک تهیه‌شده از جنس ST37

به منظور ارزیابی و اطمینان از یکسان بودن کیفیت سطح دیسک‌ها، ۱۲ دیسک به طور تصادفی انتخاب و زبری سطح آنها با دستگاه زبری‌سنج مدل Mitotuyo ver 2 ارزیابی و اندازه‌گیری شد. نمودار ۱ نتایج آزمون زبری‌سنجی را برای چهار نمونه از دیسک‌های مورد آزمایش نشان داده و مشاهده می‌شود که نمونه‌ها دارای عدد زبری نزدیک به هم هستند.



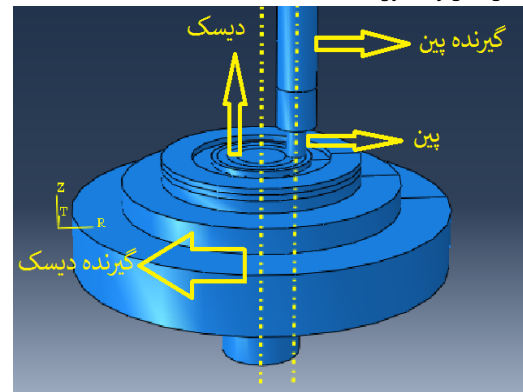
نمودار ۱) نتایج زبری‌سنجی برای چهار نمونه از دیسک‌های تهیه‌شده

در نهایت مجموعه پین و دیسک مطابق شکل ۵ بر روی دستگاه آزمایش سایش تعبیه و مقدمات آزمایش فراهم شد. توجه شود فاصله پین تا مرکز دوران بازوی دستگاه در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر ۴۵ سانتی‌متر بوده و فاصله محل اعمال وزنه برای اعمال بار روی پین تا مرکز دوران بازوی دستگاه نیز ثابت و برابر

شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمایش، فرض مذکور مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در ادامه مشاهده می‌شود که به دلیل انطباق مناسب بین نتایج تجربی و عددی، می‌توان نتیجه گرفت که فرض مذکور از دقت کافی برخوردار است. بنابراین از انجام آزمایش‌های مربوط به استخراج خواص حرارتی نانوکامپوزیت صرف نظر و خواص حرارتی پلیمر خالص با خواص حرارتی نانوکامپوزیت یکسان لحاظ شد.

اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، ابتدا شرایط مدل مشابه شرایط شبیه‌سازی /قدم و خوانساری^[13] تنظیم و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شدند. خواص موادی که آنها مورد بررسی قرار دادند در جدول ۶ نشان داده شده است. مقایسه بین نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج حاصل از مدل‌سازی /قدم و خوانساری^[13] در نمودار ۲ نشان داده شده است. مطابق این نمودار، انطباق مناسبی بین نتایج مدل المان محدود تهیه شده و نتایج شبیه‌سازی پیشین مشاهده شده و صحت مدل تایید می‌شود.



شکل ۶ مدل‌سازی مجموعه سایش مورد استفاده در نرم‌افزار آباکوس

همچنین جدول ۵ خواص مربوط به هر یک از بخش‌های تشکیل‌دهنده مدل را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و اجتناب از آزمون‌های تعیین خواص حرارتی، ابتدا فرض شد که اضافه شدن نانوذرات به پلیمر تأثیر چشمگیری بر خواص حرارتی آن ندارد و شبیه‌سازی المان محدود با این فرض انجام پذیرفت. سپس با مقایسه نتایج حاصل از

جدول ۵) خواص مواد به کاررفته در مدل‌سازی

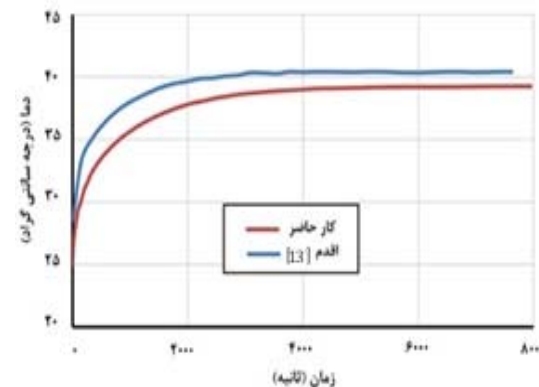
نام قطعه	جنس	چگالی $\times 10^3$ (Tonne/mm ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت گرمایی ویژه $\times 10^3$ (J/TonneK)
دیسک	فولاد ST37	۷/۸۳	۴۲/۷	۴۷۳
پین	پلی‌اتیلن خالص	$9/52 \times 10^{-3}$	۰/۴۲	۱۹۰۰
پین	نانوکامپوزیت ۱۰ درصد وزنی نانوذره	$1/058 \times 10^{-3}$	۰/۴۲	۱۹۰۰
گیرنده پین	فولاد SAE 51440 C	۷/۹۳	۱۵	۵۰۲
گیرنده دیسک	فولاد SAE 30303	۷/۶۸	۲۴/۲	۴۶۰

جدول ۶) خواص مواد به کاررفته در مدل‌سازی /قدم و خوانساری^[13]

نام قطعه	جنس	چگالی (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت گرمایی ویژه $\times 10^3$ (J/KgK)
حلقه اول	SAE 4140	۷۸۳۰	۴۲/۷	۴۷۳
حلقه دوم	برنج C36000	۸۵۰۰	۱۱۵	۳۸۰
نگهدارنده پایین	SAE 51440	۷۶۸۰	۲۴/۲	۴۶۰
نگهدارنده بالا	SAE 30303	۷۹۳۰	۱۵	۵۰۲

بحث

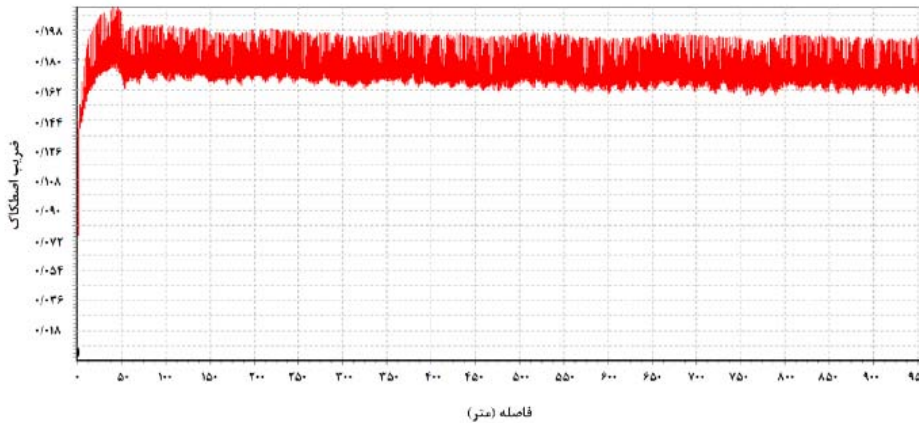
مطابق تعاریف، سایش چسبان زمانی رخ می‌دهد که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصال و نهایتاً انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر شود^[22]. مطابق نظر هاسفورد و کادل^[23]، ضریب اصطکاک در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ بین دو سطح موجب ایجاد لغزش موضعی بین دو سطح جامد شده و عملاً امکان در نظرگرفتن فرض سایش چسبان بین دو سطح را فراهم می‌نماید. بدین منظور آزمون تعیین ضریب اصطکاک تحت بار ۱۶ کیلوگرم و با سرعت ۰/۱۸ متر بر ثانیه برای هر دو نمونه پلی‌اتیلن خالص و نمونه نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره در ۹۵۰ متر فاصله طراحی و اجرا شد. مطابق



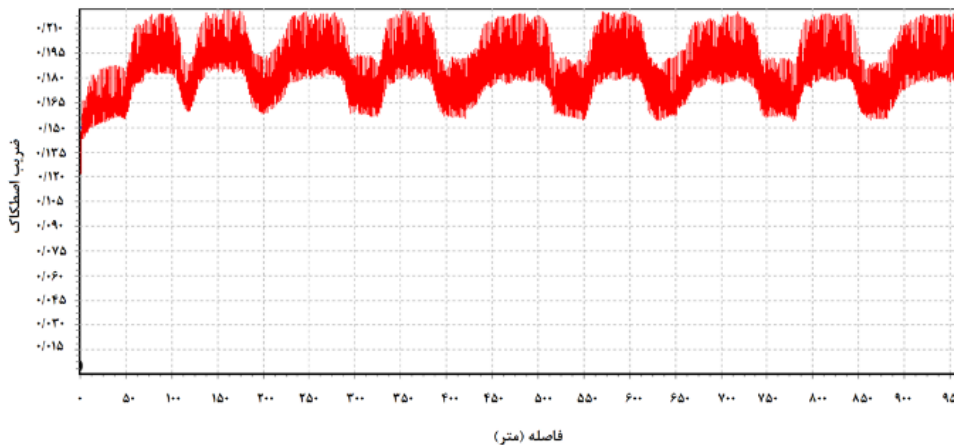
نمودار ۲) اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر با مدل /قدم و خوانساری^[13]

اگرچه با اضافه شدن نانوذرات به بستر پلیمر، ضریب اصطکاک افزایش یافته، اما ممکن است مقاومت ماده به سایش نیز افزایش یابد. بر این اساس، با مقایسه نرخ سایش در دو حالت می‌توان درک درستی از تأثیر اضافه شدن نانوذرات بر خواص سایشی پلیمرها داشت که در ادامه این موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. آنچه مهم است، میزان ضریب اصطکاک است که با توجه به اینکه در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ قرار گرفته، می‌توان فرض سایش چسبان را برای هر دو حالت پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی ۱۰٪ صحیح دانست.

نمودار ۳ ضریب اصطکاک بین دیسک فولادی و نمونه پلیمر خالص با مقدار میانگین ۰/۱۷۹ ثبت شد. همچنین نمودار ۴ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک بین دیسک و نمونه نانوکامپوزیت با ۱۰ درصد وزنی نانوذره دارای مقدار میانگین ۰/۱۹۵ است. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که با اضافه شدن نانوذرات، ضریب اصطکاک بین دیسک فولادی و نمونه پلیمری افزایش می‌یابد. توجه شود که افزایش ضریب اصطکاک به معنای سایش بیشتر نیست؛ چرا که افزایش یا کاهش مقدار نرخ سایش علاوه بر ضریب اصطکاک، به مقاومت سایشی ماده نیز بستگی دارد. بنابراین



نمودار ۳) منحنی ضریب اصطکاک نمونه پلی اتیلن خالص در آزمون سایش



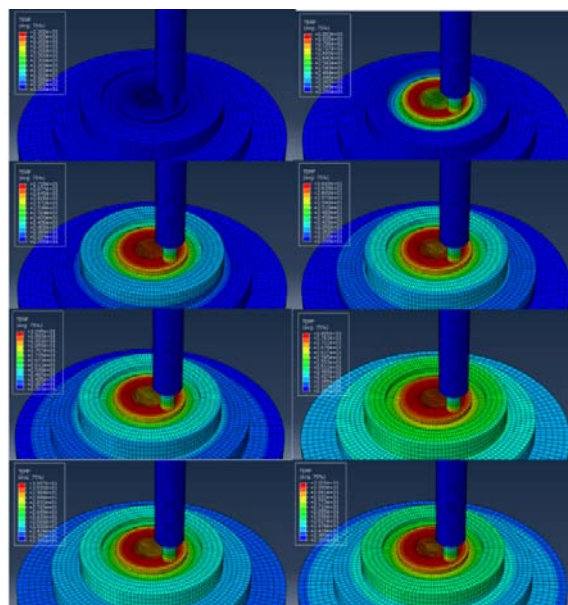
نمودار ۴) منحنی ضریب اصطکاک نمونه نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره

نتایج حاصل از آزمایش و مدل سازی برای نمونه پلی اتیلن خالص در نمودار ۵ نشان داده شده است. نتایج تجربی و شبیه سازی انطباق مناسبی از خود نشان می‌دهند. این انطباق در زمان‌های ابتدایی کمتر و به تدریج افزایش می‌یابد. بدیهی است که با گذشت زمان، دمای حاصل از سایش افزایش یابد. با این حال باید توجه شود که نتایج تجربی پس از گذشت حدود ۲۵۰۰ ثانیه، یک وضعیت نسبتاً پایدار از تغییرات دما ارایه می‌دهند؛ در حالی که

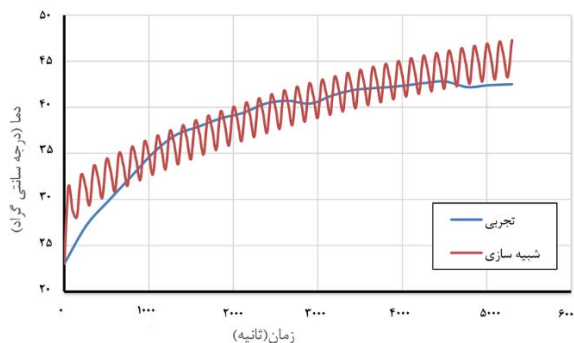
روند افزایش دما بر اثر سایش با گذشت زمان در مدل المان محدود در شکل ۷ نشان داده شده است. تغییرات دما برای کمتر از ۵۲۰۰ ثانیه بعد از زمان شروع سایش ثبت شده است. مطابق انتظار، بیشترین دما در محل تماس دو قطعه ثبت شده و با فاصله گرفتن از این مکان، دما کاهش می‌یابد. همچنین دما از دمای محیط آغاز شده و با گذشت زمان و در طی فرآیند سایش، به تدریج افزایش می‌یابد.

شبیه‌سازی به‌صورت دائمی روند صعودی را ترسیم نموده است.

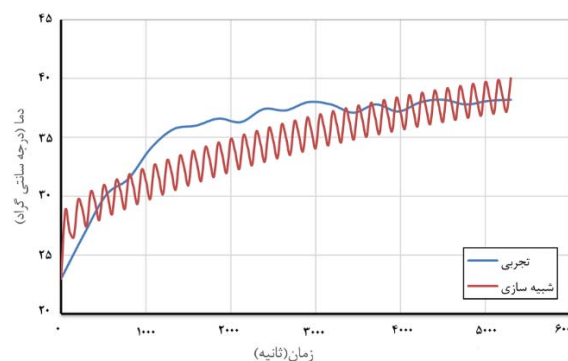
(مرحله پایداری) می‌رسد. بنابراین دمای تولیدشده توسط آن زودتر و در درجه حرارت کمتری به مقدار ثابتی همگرا می‌شود. این در حالی است که نانوکامپوزیت همچنان در حال گذراندن مرحله اول سایش بوده و در زمان دیرتری به مرحله پایداری می‌رسد. بنابراین دمای تولیدشده توسط نانوکامپوزیت بیشتر و بیشتر می‌شود تا اینکه در نهایت در مقدار مشخصی همگرا شده و مرحله دوم از سایش را تجربه کند. توجه شود که دمای بیشتر به معنای سایش بیشتر نیست؛ بلکه به معنای این است که سایش دیرتر به حالت پایدار می‌رسد.



شکل ۷) روند افزایش دما در شبیه‌سازی المان محدود



نمودار ۶) نتایج تجربی و شبیه‌سازی دما برای نمونه نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره



نمودار ۵) نتایج تجربی و شبیه‌سازی دما برای نمونه خالص پلی‌اتیلن

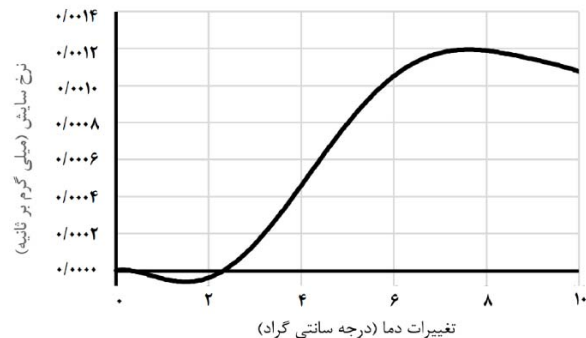
مطابق آنچه درباره مراحل سایش گفته شد، نرخ سایش در مرحله اول به‌شدت افزایش می‌یابد. سپس این مقدار کمی کاهش یافته و به مقدار پایداری میل می‌کند که مرحله دوم سایش است. در این مرحله دمای سطح نیز شروع به ثابت شدن می‌کند. مطابق نمودار ۵، با افزایش دمای سطح (یعنی اختلاف دمای بیشتر بین دمای ثانویه و اولیه)، قطعه به مرحله پایدار سایش نزدیک می‌شود. بنابراین در نمودار ۷ انتظار می‌رود با افزایش تغییرات دمای سطح (اختلاف بین دمای ثانویه و دمای اولیه)، نرخ سایش ابتدا با شدت افزایش یابد؛ سپس یک اُفت جزئی از خود نشان می‌دهد که این اُفت نمایانگر ورود به مرحله پایدار سایش است. این مساله درباره نمودار ۸ نیز صادق است. با توجه به اینکه درجه حرارت سطح نمونه از مرحله دوم سایش تقریباً ثابت باقی می‌ماند، می‌توان ادعا نمود که در این مرحله، سایش مستقل از تغییرات دمای سطح است و بررسی ارتباط این دو متغیر بی‌معنا خواهد بود. از طرفی تغییرات دما نیز بعد از رسیدن به مرحله پایداری ثابت خواهد بود؛ چرا که دمای سطح ماده در مقدار مشخصی همگرا می‌شود. لازم به توضیح است همان‌طور که بررسی شد، در نمودار ۵، حدود ۱۰۰۰ ثانیه (معادل ۵۰۰ متر اولیه آزمون سایش) طول می‌کشد تا پلیمر خالص از مرحله اول سایش به مرحله پایدار برسد. بنابراین از مرحله پایداری که در آن نرخ سایش تقریباً ثابت شده صرف‌نظر نموده و صرفاً برای ۵۰۰ متر اولیه آزمون سایش، با اندازه‌گیری دمای تولیدشده در طول آزمون، ارتباط تغییرات دمایی با نرخ سایش بررسی می‌شود. نتایج این بررسی در نمودارهای ۷ و

منحنی تغییرات دما در نمونه کامپوزیتی پلی‌اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره با زمان در نمودار ۶ نشان داده شده است. برای این ماده نیز بین نتایج حاصل از آزمایش و مدل‌سازی المان محدود در زمان‌های ابتدایی اختلاف دیده می‌شود؛ اما این اختلاف نسبت به نمونه خالص پلی‌اتیلن کمتر است. با این حال با گذشت زمان این اختلاف افزایش یافته و مقادیر پیش‌بینی‌شده با نرم‌افزار مقدار بیشتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده از خود نشان می‌دهند. همچنین مقایسه نمودارهای ۵ و ۶ نشان می‌دهند که با اضافه شدن نانوذرات به پلیمر، دمای ایجادشده بر اثر سایش افزایش می‌یابد. مادامی که نرخ سایش افزایش یابد، دما نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که نرخ سایش به یک مقدار مشخصی همگرا شود. در این شرایط، درجه حرارت ثابت شده نیز به تدریج در یک مقدار مشخص ثابت می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود زمانی که ماده به مرحله دوم سایش (مرحله پایداری) برسد، درجه حرارت نیز ثابت شود. مقایسه نمودارهای ۵ و ۶ نشان می‌دهد که پلیمر خالص، زودتر به مرحله دوم از سایش

$$W = -5 * 10^{-8} \Delta T^6 + 0.000002 \Delta T^5 - 0.00002 \Delta T^4 + 0.0001 \Delta T^3 - 0.0002 \Delta T^2 + 0.00005 \Delta T + 6 * 10^{-11} \quad (3)$$

در معادلات فوق، ΔT تغییرات دما در محل سایش را نشان می‌دهد.

مبتنی بر روابط استخراج شده، نمودار ۹ رفتار حاکم بر رابطه نرخ سایش و تغییرات دما در نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره را پیش‌بینی می‌نماید. مشاهده می‌شود که در بازه تغییرات دمایی مورد بررسی، بیشینه نرخ سایش مربوط به تغییرات دمایی بین ۷ تا ۸ درجه است.



نمودار ۹) ترسیم رابطه تجربی پیش‌بینی ارتباط بین نرخ سایش با تغییرات دما برای نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره

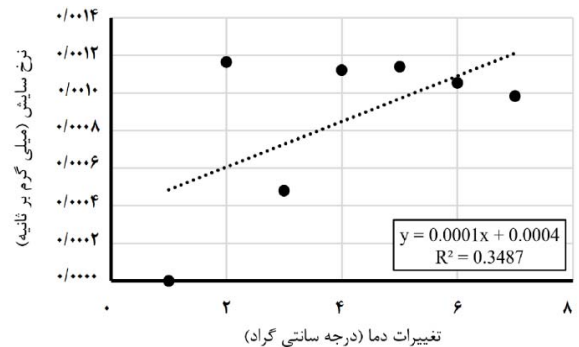
نتیجه‌گیری

ارتباط بین نرخ سایش و تغییرات دما در لغزش خشک نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره بر روی فولاد ST37 به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور یک مدل المان محدود سه‌بعدی برای بررسی آزمایش سایش ارائه شد. صحت این مدل در مقایسه با نتایج المان محدود پیشین مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین یک آزمایش شبیه‌سازی روی دیسک طراحی و نتایج حاصل از آزمایش با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شدند. هدف اصلی، بررسی خطی یا غیرخطی بودن ارتباط بین دما و نرخ سایش در پلیمر پلی اتیلن بود؛ چرا که پژوهش‌های پیشین در حوزه فلزات و آلیاژهای فلزی، تأکید فراوانی بر ارتباط خطی بین این دو متغیر داشتند. همچنین به منظور بررسی بیشتر این مساله، با اضافه کردن نانوذرات و ایجاد نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی، اثر این نانوذرات بر خطی شدن ارتباط بین دما و نرخ سایش نیز مد نظر قرار گرفت.

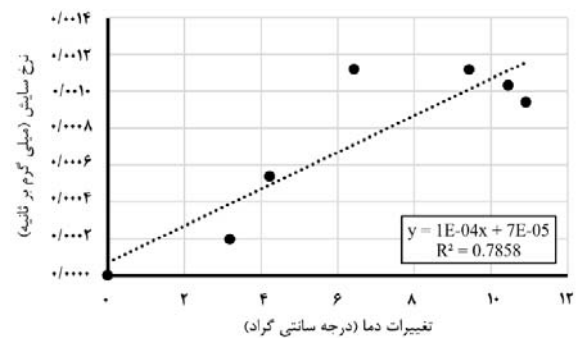
نتایج نشان داد که اضافه شدن نانوذرات اکسید روی با روش ارائه شده، تا ۶۴٪ موجب افزایش استحکام کششی نسبت به پلیمر خالص می‌شود. بررسی المان محدود و شبیه‌سازی نیز نشان داد که برای هر دو مورد پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی، مقادیر پیش‌بینی شده در نرم‌افزار اندکی از مقدار اندازه‌گیری شده بیشتر است. از دلایل این اختلاف می‌توان صرف نظر از اتلاف گرمای موجود در ذرات جدا شده از سایش و سایر اثرات انتقال گرمای همرفت اشاره نمود. همچنین نتایج نشان داد

۸ به ترتیب برای پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت ارائه می‌شود. بر این اساس، نتایج مربوط به نمودارهای ۷ و ۸، صرفاً مربوط به مرحله اول سایش است.

لازم به ذکر است که در نمودارهای ۷ و ۸، از هفت عدد نمونه از بین یکسان استفاده شده است؛ زیرا توقف آزمایش به منظور اندازه‌گیری نرخ سایش موجب اُفت دما در نمونه می‌شود و خطاهای دیگری را در پی خواهد داشت.



نمودار ۷) اثر تغییرات دما بر نرخ سایش پلیمر پلی اتیلن خالص



نمودار ۸) اثر تغییرات دما بر نرخ سایش نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره

مطابق نمودارهای ۷ و ۸، برخلاف پژوهش‌های صورت گرفته بر روی فلزات [12, 14, 19, 20] ارتباط بین نرخ سایش و افزایش درجه حرارت به صورت خطی مشاهده نمی‌شود. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند این باشد که در پلیمرها با افزایش دما ماده با شدت بیشتری نسبت به فلزات نرم‌تر شده و قابلیت تغییر شکل‌های کوچک آن در سطح تماس افزایش می‌یابد. در نتیجه نرخ سایش در پلیمرها کاهش می‌یابد و از میزان خطی بودن ارتباط مذکور می‌کاهد. با این حال، میزان خطی بودن در مورد نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره با مقدار R^2 برابر با ۰/۷۸۵۸ بیشتر از پلی اتیلن خالص است.

همچنین بررسی تجربی بر روی نرخ سایش و تغییرات دما نشان می‌دهد که این دو پارامتر مطابق معادلات ۲ و ۳ به ترتیب برای پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت پلی اتیلن اکسید روی با ۱۰ درصد وزنی نانوذره با یکدیگر دارای ارتباط غیرخطی از مرتبه ۶ هستند.

$$W = -10^{-5} \Delta T^6 + 0.0004 \Delta T^5 - 0.0037 \Delta T^4 + 0.0187 \Delta T^3 - 0.0494 \Delta T^2 + 0.0635 \Delta T - 0.0294 \quad (2)$$

- of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration. *Wear*. 2006;261(11-12):1213-1224.
- 9- Yan W, O'Dowd NP, Busso EP. Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2002;50(3):449-470.
- 10- Kónya L, Váradi K, Flöck J, Friedrich K. Finite-element heat-transfer analysis of a PEEK-steel sliding pair in a pin-on-disc configuration. *Tribotest*. 2001;8(1):1-26.
- 11- Zhang Z, Friedrich K, Velten K. Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks. *Wear*. 2002;252(7-8):668-675.
- 12- Amiri M, Khonsari MM, Brahmeshwarkar S. On the relationship between wear and thermal response in sliding systems. *Tribology Letters*. 2010;38(2):147-154.
- 13- Aghdam AB, Khonsari MM. On the correlation between wear and entropy in dry sliding contact. *Wear*. 2011;270(11-12):781-790.
- 14- Aghdam AB, Khonsari MM. Prediction of wear in reciprocating dry sliding via dissipated energy and temperature rise. *Tribology Letters*. 2013;50(3):365-378.
- 15- Amiri M, Khonsari MM, Brahmeshwarkar S. An application of dimensional analysis to entropy-wear relationship. *Journal of Tribology*. 2012;134(1):011604.
- 16- Kennedy FE, Lu Y, Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. *Tribology International*. 2015;82:534-542.
- 17- Ahmadifard S, Kazemi S, Heidarpour A. Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir process and investigating its microstructural, mechanical and wear properties. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;15(12):55-62. [Persian]
- 18- Mbarek M, Rhaïem S, Kharrat M, Dammak M. Experimental simulation of the friction, temperature, and wear distributions for polyamide-steel gear contact using twin-disc setup. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2016;230(9):1127-1138.
- 19- Aghdam AB, Khonsari MM. Application of a thermodynamically based wear estimation methodology. *Journal of Tribology*. 2016;138(4):041601.
- 20- Rudas JS, Gómez LM, Toro A, Gutiérrez JM, Corz A. Wear rate and entropy generation sources in a Ti6Al4V-WC/10Co sliding pair. *Journal of Tribology*. 2017;139(6):061608.
- 21- Nikueimanesh A, Akbarzadeh S. Numerical and experimental investigation of wear in nanostructured tin coating on steel substrate. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(1):149-155. [Persian]
- 22- Najafi A. Numerical and experimental study of the wear behavior of Polyethylene/ZnO nanocomposite [dissertation]. Isfahan: Isfahan University; 2017. [Persian]
- 23- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.

که برخلاف فلزات، ارتباط بین نرخ سایش و تغییرات دما در پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت آن، به خوبی از یک رابطه خطی تبعیت نمی کند. با این حال میزان خطی بودن در نانوکامپوزیت بیشتر است. بنابراین می توان ادعا نمود که حضور نانوذرات اکسید روی در پلیمر پلی اتیلن با ویژگی های بیان شده، علاوه بر آنکه سبب تقویت خواص مکانیکی این پلیمر می شود، موجب کاهش اثرات غیرخطی حاکم بر ارتباط دما و نرخ سایش می شود. اهمیت این موضوع جایی روشن می شود که مدل های آنتروپی پایه در پیش بینی خرابی ناشی از سایش، بر روابط خطی بین دما و نرخ سایش بنا شده اند. لازم به ذکر است که بررسی های انجام شده نشان می دهد که بهترین رابطه غیرخطی برای پیش بینی ارتباط نرخ سایش و تغییرات دما در پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت آن، یک رابطه مرتبه ۶ است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) با شماره قرارداد ۹۴۰۰۰۴ تشکر می نمایند.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: علی نجفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ امیرسجاد خدای (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ صالح اکبرزاده (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

منابع

- 1- Rabinowicz E. Friction and wear of materials. New York: Wiley; 1995.
- 2- Ringey DA, Glaeser WA. Wear resistance. Cleveland: American Society for metals; 1978.
- 3- Chattopadhyay R. Advanced thermally assisted surface engineering processes. New York: Springer; 2004.
- 4- Kennedy F. Surface temperatures in sliding systems-a finite element analysis. *Journal of Tribology*. 1981;103(1):90.
- 5- Kennedy Jr FE. Thermal and thermomechanical effects in dry sliding. *Wear*. 1984;100(1-3):453-476.
- 6- Tian X, Kennedy Jr FE. Contact surface temperature models for finite bodies in dry and boundary lubricated sliding. *Journal of Tribology*. 1993;115(3): 411-418.
- 7- Podra P, Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International*. 1999;32(2):71-81.
- 8- Benabdallah H, Olender D. Finite element simulation