

## تأثیر شرایط آندایزینگ بر مقاومت به سایش، سختی سطحی و تغییر ابعاد آلیاژهای آلومینیوم هوایی

یزدانی، علی<sup>1\*</sup>، زارعی، آرمان<sup>2</sup>

1- عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران

2- کارشناس ارشد، سازمان صنایع دریایی، شیراز، ایران

(دریافت مقاله: 1389/1/24 تاریخ پذیرش: 1389/9/13)

### چکیده

در صنعت هوایی، به دلیل بالا بودن نسبت استحکام به وزن، از آلیاژهای آلومینیوم به میزان زیادی استفاده می‌شود. اکسیداسیون آندی که فرایندی الکتروشیمیایی برای ایجاد لایه‌های پایدار بر روی سطح فلزات است، یکی از منحصربه‌فردترین روش‌هایی است که به‌طور گسترده برای افزایش کیفیت سطح از جمله مقاومت به خوردگی و سایش استفاده می‌شود. در این مقاله تحت چگالی جریان‌های مختلف ( $2/6 A/dm^2$  و  $3/2 A/dm^2$ )، پوشش‌های آندایزینگ سخت به ضخامت‌های متفاوتی ( $25\mu m$ ،  $50\mu m$ ،  $64\mu m$  و  $76\mu m$ ) بر روی آلیاژهای هوایی آلومینیوم از جمله T6-7075، T3-2024 و T6-6061 اعمال شده و در شرایط آب‌بندی و بدون آب‌بندی، خواص سایشی، میکروسختی و افزایش ابعاد نمونه‌ها بررسی شده است. نمونه‌ها در اسید سولفوریک آندایز شدند. نتایج آزمون‌های سایش بیانگر یکنواختی پوشش‌های اعمالی در کلیه آلیاژها و همچنین کاهش مقاومت به سایش نمونه‌ها، در حالت آب‌بندی نسبت به بدون آب‌بندی است. عملیات آب‌بندی تأثیر زیادی در کاهش سختی نمونه‌ها نداشته است. با افزایش ضخامت پوشش تا  $76\mu m$ ، سختی کلیه نمونه‌ها افزایش یافته و بعد از آن سختی کاهش یافته است. با افزایش چگالی جریان، میزان افزایش ابعاد ناشی از آندایزینگ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آندایزینگ، سختی، سایش، ابعاد

### مقدمه

به علت خواص خاص لایه‌های اکسیدی آلومینیوم، قطعات

آلومینیوم آندایز شده به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله بسته‌بندی، معماری و صنایع هوایی کاربرد دارند، که با توجه به شرایط آندایزینگ، این خواص می‌تواند بسیار متفاوت باشد. موضوع تأثیر شرایط فرایند آندایز بر خواص لایه حاصل، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در این زمینه پژوهش‌های زیادی انجام شده است [9]. در بعضی موارد، خواص مکانیکی از جمله سختی و مقاومت به سایش نقش کلیدی دارد. بیشتر مطالعات در این زمینه بر روی میکرو سختی و مقاومت به سایش لایه‌های آندی اکسید آلومینیوم حاصل از آندایزینگ سخت است. از خواص پوشش آندایز سخت، افزایش سختی سطح فلز می‌باشد که این افزایش به دلیل تشکیل لایه سطحی اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) است که سختی بسیار زیادی (تقریباً  $2000Kg/mm^2$ ) دارد. سختی سطحی فلز آندایز

نسبت استحکام به وزن بالای گروه‌های 2000، 6000 و 7000 آلیاژهای آلومینیوم سبب استفاده زیاد آنها در صنایع هوایی شده است [1 و 2]. در صنایع هواپیماسازی برای افزایش مقاومت به خوردگی و سایش این آلیاژها، مخصوصاً آلیاژهای T3-2024 و T6-7075، از عملیات سطحی آندایزینگ استفاده می‌شود. در این فرایند، ضخامت لایه اکسیدی آلومینیوم که به‌طور طبیعی نیز بر روی سطح تشکیل می‌شود، افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه اکسیدی حاصل از آندایز علاوه بر مقاومت به خوردگی و سایش سبب تغییر رفتار خستگی این آلیاژها نیز می‌شود. به دلیل اهمیت این موضوع در سازه‌های هوایی، کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه خستگی این آلیاژها [3 و 4] و اثر عملیات سطحی [5 و 6] و مخصوصاً آندایزینگ [7 و 8] بر رفتار خستگی آنها انجام شده است، که خارج از موضوع این مقاله است.

\* نویسنده پاسخگو، پست الکترونیک: aliyazdani165@yahoo.com

ریزساختار ناشی از عملیات حرارتی و فرایندهای مختلف تولید نیز علاوه بر شرایط آندایزینگ، بر خواص سایشی و سختی قطعات آندایز شده موثر است [15].

به دلیل کاربرد لایه‌های اکسیدی آلومینیوم در صنایع الکترونیک، مغناطیس و نانوساختارها، علاوه بر خواص مکانیکی، تحقیقات زیادی نیز در زمینه تغییر ابعاد ناشی از آندایزینگ انجام شده است [16]. بر این اساس، ابعاد قطعاتی که آندایزینگ نوع دوم شده‌اند به میزان یک سوم ضخامت کل پوشش و ابعاد قطعاتی که تحت عملیات آندایزینگ نوع سوم قرار گرفته‌اند به میزان یک دوم ضخامت کل پوشش افزایش می‌یابند. تغییر ابعاد حاصل از عملیات آندایزینگ، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند چگالی جریان، غلظت الکترولیت و درجه حرارت و ضخامت پوشش قرار دارند.

با توجه به اینکه پوشش‌های آندایزینگ در بسیاری از صنایع از جمله، نظامی، تزئینی و کاربردهای حفاظتی سطح فلزات کاربرد دارند، مطالعه تغییر ابعاد، به‌ویژه در مواردی که در ساخت نیاز به تلورانس‌های دقیق و مونتاژ صحیح قطعات می‌باشد، اهمیت زیادی دارد. در ضمن عملیات آندایزینگ، سطح فلز در اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی به اکسید آلومینیوم تغییر پیدا می‌کند. برای تشکیل فیلم آندی، آلومینیوم حل می‌شود و ضخامت قطعه آلومینیومی اولیه مقداری کاهش پیدا می‌کند و در ادامه این کاهش به‌وسیله تشکیل فیلم اکسید جبران می‌شود و ابعاد به‌طور جزئی افزایش می‌یابد [17].

در این تحقیق آلیاژهای مختلف 2024-T3، 6061-T6 و 7075-T6 آلومینیوم، تحت عملیات آندایزینگ سخت قرار گرفته و تأثیر شرایط آندایزینگ بر مقاومت به سایش، سختی سطحی و تغییر ابعاد نمونه‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### روش اجرایی آزمایش آندایزینگ سخت

با توجه به مراجع موجود، حمام آندایزینگ مورد استفاده در این تحقیق، محلول الکترولیت اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ )، به غلظت  $190 \pm 3$  g/L انتخاب شد. درجه حرارت عملیات آندایزینگ سخت صفر درجه سانتی‌گراد و چگالی جریان‌های مورد استفاده برای عملیات آندایزینگ سخت  $2/6 A/dm^2$ ،  $3/2 A/dm^2$  و  $4/3 A/dm^2$  در نظر گرفته شده است. بعد از

سخت‌شده حتی از بسیاری از فولادهای سخت‌شده و پوشش کروم سخت هم بالاتر است.

عملیات پوشش‌دهی آندایزینگ سخت معمولاً در الکترولیت‌های اسید سولفوریک، در درجه حرارت‌های پایین (تقریباً  $0^\circ C$ ) و تحت چگالی جریان بالا (بیشتر از  $2 A/dm^2$ ) انجام می‌شود. آندایزینگ سخت (نوع سوم) [10] برای کاربردهایی که نیاز به سختی و مقاومت سایشی عالی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از آب‌بندی کردن قطعات آندایز سخت‌شده، مقاومت به خوردگی آنها افزایش می‌یابد و شکل ظاهری آنها نیز بهتر می‌شود [11].

خواص لایه اکسیدی مذکور معمولاً با به‌کار بردن الکترولیت‌های خاص در دماهای پایین حاصل می‌شود که در نتیجه آن لایه‌های اکسیدی آندی ضخیم (معمولاً ضخیم‌تر از  $25 \mu m$ ) با سختی و مقاومت به سایش بالا تشکیل می‌شود. فرایند آندایزینگ سخت بر روی مواد مرکب زمینه فلزی از جنس آلومینیوم نیز به‌کار می‌رود [12].

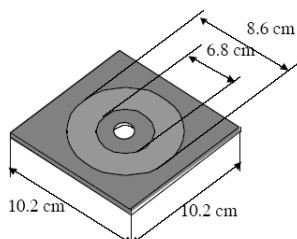
در زمینه تأثیر دمای الکترولیت بر خواص لایه اکسیدی تحقیقاتی را Scott انجام داده است او نشان داد که با آندایزینگ در حمام الکترولیت اسید سولفوریک در چگالی جریان ثابت  $4 A/dm^2$ ، تغییرات دمای الکترولیت از  $5^\circ C$  تا  $15^\circ C$ ، به‌شدت بر مقاومت به سایش لایه‌های آندی اکسید آلومینیوم اثر می‌گذارد.

تحقیقات Koizumi و همکارانش نشان می‌دهد که مقاومت به سایش نمونه‌های آندایز شده در اسید سولفوریک با چگالی جریان بین  $1 A/dm^2$  تا  $8 A/dm^2$ ، در دامنه دمایی  $5-$  تا  $5^\circ C$  درجه سانتی‌گراد، ثابت است اما با افزایش دما به  $20^\circ C$ ، مقاومت به سایش با افزایش دما کاهش می‌یابد. خلل و فرج لایه‌های آندی علت اصلی کاهش مقاومت به سایش گزارش شده است. در حین فرایند آندایزینگ سخت با افزایش ضخامت لایه اکسیدی، در دماهای بالاتر، مقاومت به سایش و سختی کاهش می‌یابد [13].

بررسی‌های Hsing-Hsiang Shih و همکارانش نشان می‌دهد، در آندایزینگ با محلول اسید سولفوریک، ضخامت لایه آندی و میکروسختی با افزایش زمان آندایزینگ افزایش می‌یابد تا اینکه به یک حد ماکزیمم خود می‌رسد، سپس سختی کاهش می‌یابد. با اضافه کردن اسید نیتریک و اصلاح‌کننده (Modifier) سختی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد [14].

ASTM B244 با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری جریان گردابی مشخص گردید.

با توجه به میزان کاهش وزن و کاهش ضخامت نمونه‌ها، چگالی پوشش هر گروه از آلیاژها محاسبه شد، که نتایج آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.



شکل 1- طرح کلی آزمایش سایشی Taber نمونه‌ها

جدول 1- چگالی و مقدار درصد  $Al_2(SO_4)_3$  موجود در پوشش آندی نمونه‌ها

نوع آلیاژ آندایز سخت‌شده	2024-T3	6061-T6	7075-T6
چگالی پوشش $\frac{g}{cm^3}$	2/29	2/45	2/39

در ادامه بر اساس آزمون‌های نمونه‌های پوشش داده شده، میزان عمق نفوذ پوشش با استفاده از کاهش وزن حاصل از انجام دادن آزمایش سایش تیبر بر اساس فرمول 1 محاسبه گردید.

$$d = \frac{w}{A \cdot d} \quad (1)$$

در این رابطه:

$d$ : عمق نفوذ پوشش

$w$ : وزن کاهش یافته در اثر آزمایش سایشی

$A$ : مساحت چرخ ساینده ( $2/18 \text{ cm}^2$ )

$d$ : چگالی پوشش که در جدول 1 آورده شده است.

### آزمون سختی

هدف از انجام دادن این مرحله از آزمایش‌ها، اندازه‌گیری سختی سطحی (سختی پوشش تشکیل شده) نمونه‌های آندایز سخت‌شده و بررسی اثر ضخامت پوشش و چگالی جریان بر مقدار سختی سطح می‌باشد. برای این منظور تعداد 30 نمونه از هر یک از آلیاژهای آلومینیوم 2024-T3، 6061-T6 و 7075-T6 با ابعاد  $10/2 \text{ cm} \times 10/2 \text{ cm} \times 0/1 \text{ cm}$

انجام عملیات آندایزینگ، نمونه‌ها با آب‌مقطر شسته شده و با دمش هوا (سشوار) خشک شده است.

### آزمون سایش

آزمایش سایش تیبر (Taber wear test) بر اساس استاندارد FED-STD-141، برای اندازه‌گیری مقاومت به سایش پوشش‌های آندایزینگ در ایالات متحده امریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش بهترین نتیجه را می‌دهد و در مورد تعیین مقاومت به سایش پوشش‌های آندایزینگ سخت هم بسیار موثر است. بر اساس استانداردهای MIL-A-8625F، ASTM D 4060، AMS 2466 و AMS 2469E، آزمایش سایشی تیبر تنها روش اندازه‌گیری مقاومت سایشی پوشش‌های آندایزینگ می‌باشد.

در انجام این مرحله از تحقیقات، مقاومت سایشی نمونه‌های آندایزینگ سخت‌شده آلیاژهای 2024-T3، 6061-T6 و 7075-T6، در حالت آب‌بندی و بدون آب‌بندی، با استفاده از روش تیبر اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

تعداد چهار نمونه از هر آلیاژ با ابعاد  $10/2 \text{ cm} \times 0/1 \text{ cm} \times 10/2 \text{ cm}$  (4"×4"×0/04") بر طبق استاندارد FED-STD-141 تهیه و در محلول آلکالین تمیز شده و بعد از شستشو با آب در محلول اسیدی، اکسیدزدایی و دوباره با آب شسته شدند. سپس نمونه‌ها تحت چگالی جریان  $3/2 \text{ A/dm}^2$  با شرایط ذکر شده در بالا، تحت عملیات آندایزینگ سخت قرار گرفته و پوششی به ضخامت  $50 \mu\text{m}$  بر روی قطعات ایجاد گردید. برای بررسی تاثیر آب‌بندی بر مقاومت به سایش این آلیاژها، دو نمونه از هر آلیاژ بعد از آندایزینگ به‌وسیله محلول آب‌مقطر و استات نیکل ( $5/7$  سی‌سی در یک لیتر آب) در دمای 90 درجه سانتی‌گراد، به مدت 30 دقیقه آب‌بندی شدند.

همان‌طوری که ذکر شد، آزمایش سایش بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد FED-STD-141 روش 6192 انجام گردید. در این آزمایش دیسک چرخان سایشی از نوع CS-17 تحت بار 1000 گرم و با سرعت 70 rpm با تعداد دور گردش کل 100/000 دور در هر دو سمت نمونه‌ها انجام شد. در انجام این آزمایش عمق نفوذ به‌وسیله تفاوت در ضخامت پوشش در منطقه تحت تاثیر آزمایش سایش که در شکل 1 هم مشخص شده، قبل و بعد از هر 10/000 دور چرخش صفحه ساینده تعیین گردید. ضخامت پوشش بر اساس استاندارد

$$T_3 = \frac{W_1 - W_2}{S \cdot d} \times 1000 \quad (2)$$

در فرمول 2 داریم:

$W_1$ : وزن نمونه آلیاژی آلومینیوم قبل از آندایزینگ

$W_2$ : وزن نمونه آلیاژی آلومینیوم بعد از آندایزینگ

$S$ : مجموع مساحت سطوح نمونه آلیاژی آلومینیوم قبل از آندایزینگ

$d$ : چگالی نمونه آلیاژی آلومینیوم بر حسب g/cm<sup>3</sup>

در این قسمت، نتایج به صورت درصد افزایش ابعاد روی هر سطح بر اساس فرمول 3 به دست می آید [10].

$$D = \frac{T_4}{T_2} \times 100\% = \frac{T_2 - T_3}{T_2} \times 100\% \quad (3)$$

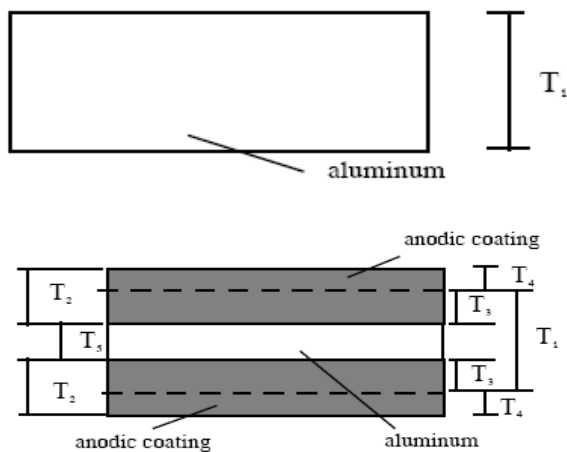
در این معادله :

$T_2$ : ضخامت کل لایه آندی. (قسمت رشد کرده و نفوذ کرده)

$T_3$ : عمق نفوذ لایه آندی به سطح اولیه نمونه

$T_4$ : ابعاد واقعی سطح رشد کرده آندی روی سطح اولیه نمونه

$D$ : درصد افزایش ابعاد سطح



$T_1$ : ضخامت نمونه قبل از آندایزینگ

$T_2$ : ضخامت پوشش اکسیدی روی هر سطح آندایز شده

$T_3$ : کاهش ضخامت روی هر سطح آلومینیوم اولیه در اثر عملیات آندایزینگ

$T_4$ : ضخامت به وجود آمده روی هر سطح در اثر عملیات آندایزینگ

$T_5$ : ضخامت آلومینیوم بعد از برطرف شدن لایه اکسیدی

شکل 2- تغییر ابعاد روی هر کدام از دو سطح نمونه‌ها

قبل و بعد از آندایزینگ [18]

(4"×4"×0/04") تهیه و تحت چگالی جریان‌های مختلف ( $2/6 A/dm^2$  و  $3/2 A/dm^2$ )، به ضخامت‌های مختلفی ( $25\mu m$ ,  $50\mu m$ ,  $64\mu m$ ,  $76\mu m$  و  $100\mu m$ ) آندایز سخت شدند. سپس برای بررسی اثر آب‌بندی بر سختی نمونه‌ها، تعداد 10 نمونه از آلیاژهای فوق به وسیله محلول آب‌مقطر و استات نیکل داغ به مدت 30 دقیقه آب‌بندی شدند و در نهایت سختی سطحی پوشش‌ها اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری سختی پوشش بر اساس آزمون میکروسختی منطبق با استاندارد ASTM E 92 انجام گرفته است. در این روش بار اعمالی 0/050 Kgf می‌باشد که توسط دستگاه میکروسختی سنج اعمال می‌گردد و مقدار سختی سطحی بر حسب ویکرز مشخص می‌شود. هر نمونه در سه نقطه مختلف مورد آزمایش و اندازه‌گیری سختی قرار گرفت. تلورانس تجهیزات اندازه‌گیری (HV)  $\pm 5$  بود.

#### بررسی تغییر ابعاد

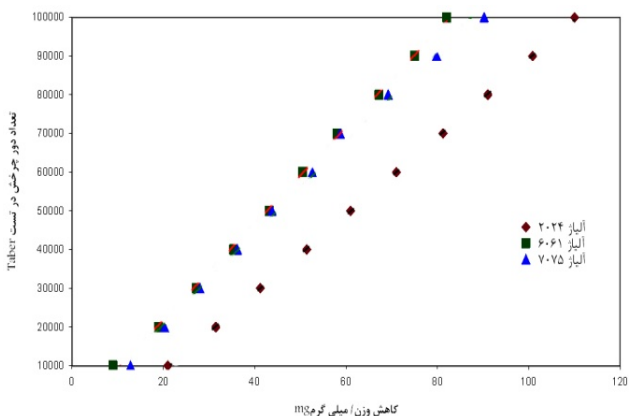
نمونه‌هایی از آلیاژهای مختلف 2024-T3، 6061-T6 و 7075-T6 با ابعاد  $10/2 \times 10/2 \times 0/1$  cm با تهیه و بعد از تمیزکاری مناسب آنها را وزن کرده، سپس تحت عملیات آندایزینگ سخت قرار داده شدند. درجه حرارت عملیات آندایزینگ سخت (آندایزینگ نوع سوم) صفر درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نمونه‌ها تحت چگالی جریان‌های  $2/6 A/dm^2$ ،  $3/2 A/dm^2$  و  $4/3 A/dm^2$  آندایزینگ سخت شدند. حمام آندایزینگ مورد استفاده دارای محلول الکترولیت اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ )، به غلظت  $190 \pm 3$  g/L بود. بعد از انجام عملیات آندایزینگ، نمونه‌ها با آب شسته شده و با دمش هوا (سشوار) خشک شدند.

در این آزمون، تفاوت وزن نمونه‌های آلومینیومی قبل و بعد از عملیات آندایزینگ معیاری برای تشخیص نفوذ پوشش آندی در سطح نمونه‌ها قرار گرفته است. تغییر ابعاد روی دو سطح مختلف نمونه‌ها قبل و بعد از آندایزینگ در شکل 2 نشان داده شده است.

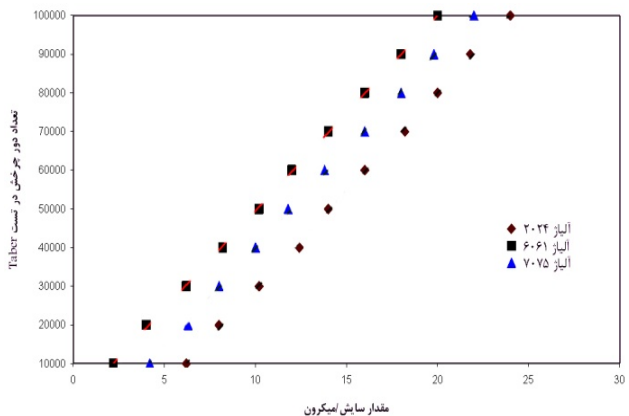
در طی عملیات آندایزینگ، رشد لایه پوشش آندی هم بر روی سطح بیرونی و هم به سمت داخل است. ضخامت کل پوشش با استفاده از یک دستگاه ضخامت‌سنج (سیستم جریان گردابی) تعیین می‌شود. میزان عمق نفوذ لایه اکسیدی به زیر سطح نمونه با استفاده از فرمول 2 قابل محاسبه است [10].

جدول 3- مقدار کاهش وزن نمونه‌ها در آزمایش سایش بر اساس تعداد دور

تعداد دور چرخش صفحه ساییده آزمایش Taber	مقدار کاهش وزن بر حسب میلی‌گرم		
	2024-T3	6061-T6	7075-T6
10000	21	10/2	12/0
20000	31/5	19/0	20/3
30000	41/2	27/2	28/0
40000	51/4	35/4	36/2
50000	61/0	43/2	43/8
60000	71/0	50/5	52/6
70000	81/2	58/0	58/7
80000	91/0	67/2	69/2
90000	100/8	75/0	79/8
100000	110/0	82/0	90/2



شکل 3- نمودار مقدار کاهش وزن نمونه‌های آزمایش شده بر اساس تعداد دور چرخش آزمایش Taber



شکل 4- نمودار مقدار سایش بر اساس تعداد دور چرخش آزمایش Taber

## نتایج و بحث

### بررسی مقاومت به سایش نمونه‌های آندایزینگ سخت بدون آب‌بندی

کاهش وزن پوشش آندی بعد از هر 10/000 دور چرخش صفحه ساییده اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از عمق نفوذ و اختلاف وزن در جداول 2 و 3 و شکل های 3 و 4 نشان داده شده است. پوشش آندی که بر روی سطح آلومینیوم در محلول الکترولیت اسیدسولفوریک تشکیل می‌شود ساختاری متخلخل دارد که شامل تعداد زیادی سلول‌های ریز هگزاگونال با سوراخ مرکزی است. با بررسی عمق نفوذ مشخص است که عمق نفوذ پوشش آندی هر سه نمونه آلیاژی به‌طور خطی با تعداد دور چرخش صفحه ساییده افزایش می‌یابند. به عبارت دیگر مقاومت سایش پوشش آندی حاصل شده در عمق پروفیل ثابت است و این نشان‌دهنده هموزن و یکنواخت بودن ساختار و ترکیب پوشش آندی می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش سایش آلیاژهای آندایزینگ سخت‌شده 2024-T3، 6061-T6 و 7075-T6 با فولاد کروم سخت‌شده 4340، مشخص می‌شود که سختی این آلیاژها در حالت آندایز بیشتر از فولاد مذکور است. همچنین مشخص می‌شود که آلیاژهای آندایز سخت‌شده 6061-T6 و 7075-T6 مقاومت سایشی بهتری نسبت به آلیاژ آندایز سخت شده 2024-T3 دارند. این مسئله می‌تواند به دلیل بالاتر بودن چگالی پوشش‌های تشکیل‌شده بر روی این دو آلیاژ نسبت به پوشش آندی 2024-T3 باشد.

جدول 2- مقدار سایش نمونه‌ها بر اساس تعداد دور آزمایش سایشی

تعداد دور چرخش صفحه ساییده آزمایش Taber	مقدار سایش بر حسب میکرون		
	2024-T3	6061-T6	7075-T6
10000	6/2	2/2	4/2
20000	8/0	4/0	6/3
30000	10/2	6/2	8/0
40000	12/4	8/2	10/0
50000	14/0	10/2	11/8
60000	16/0	12/0	13/8
70000	18/2	14/0	16/0
80000	20/0	16/0	18/0
90000	21/8	18/0	19/8
100000	24/0	20/0	22/0

در ادامه، یک سری نمونه جدید تهیه و آزمون‌های سایش را در مورد آنها انجام داده و نتایج را با محاسبات فرمول 1، مقایسه کرده‌ایم (جدول 4). با مقایسه نتایج حاصل از محاسبه و نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق نفوذ، مشخص است که مقدار عمق نفوذی که بر اساس محاسبات به دست آمده، اندکی پایین‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده است. این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که در روش محاسبه، عمق نفوذ، میانگین کاهش ضخامت پوشش روی تمام سطح چرخ ساینده است ولی در روش اندازه‌گیری عمق سایش، کاهش ضخامت پوشش در مرکز چرخ ساینده به دست می‌آید. کاهش ضخامت در لبه‌های چرخ سایشی مقداری از مرکز چرخ ساینده کمتر است و دلیل اختلاف رقم‌های حاصل به همین علت می‌باشد. نتایج حاصل از جدول 4 نشان می‌دهند که کاهش وزن و عمق نفوذ حاصل از آزمایش سایش تیبر می‌تواند با یک خطای قابل قبولی به یکدیگر تبدیل شوند.

در ادامه، یک سری نمونه جدید تهیه و آزمون‌های سایش را در مورد آنها انجام داده و نتایج را با محاسبات فرمول 1، مقایسه کرده‌ایم (جدول 4). با مقایسه نتایج حاصل از محاسبه و نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق نفوذ، مشخص است که مقدار عمق نفوذی که بر اساس محاسبات به دست آمده، اندکی پایین‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده است. این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که در روش محاسبه، عمق نفوذ، میانگین کاهش ضخامت پوشش روی تمام سطح چرخ ساینده است ولی در روش اندازه‌گیری عمق سایش، کاهش ضخامت پوشش در مرکز چرخ ساینده به دست می‌آید. کاهش ضخامت در لبه‌های چرخ سایشی مقداری از مرکز چرخ ساینده کمتر است و دلیل اختلاف رقم‌های حاصل به همین علت می‌باشد. نتایج حاصل از جدول 4 نشان می‌دهند که کاهش وزن و عمق نفوذ حاصل از آزمایش سایش تیبر می‌تواند با یک خطای قابل قبولی به یکدیگر تبدیل شوند.

جدول 5- مقایسه کاهش وزن (mg) بر اساس هر 10/000 دور نمونه‌های آلیاژی آندایز سخت شده و بدون آب‌بندی

نوع نمونه آلیاژی	نوع عملیات آندایزینگ سخت	کاهش وزن (mg) بر اساس هر 10/000 دور
2024-T3	آب‌بندی شده	13/1
	آب‌بندی نشده	7/2
6061-T6	آب‌بندی شده	11/1
	آب‌بندی نشده	8/9
7075-T6	آب‌بندی شده	11/9
	آب‌بندی نشده	7/9

### بررسی سختی نمونه‌های آندایزینگ سخت شده بدون آب‌بندی

میانگین نتایج میکروسختی آلیاژها، با پوشش (آندایز شده) در جداول 6، 7 و 8 و نمونه‌های بدون پوشش در جدول 9 آورده شده است. از نتایج حاصل از اعمال پوشش آندایزینگ سخت بر روی نمونه‌ها مشخص می‌شود که سختی سطحی نمونه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده‌اند. همچنین مشخص می‌شود که با افزایش ضخامت تا 76µm سختی سطحی به‌طور پیوسته در تمامی نمونه‌های آلیاژی افزایش می‌یابد و از ضخامت 76µm تا 100µm سختی مقداری کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به دلیل عدم تشکیل کامل لایه سخت اکسیدی در ضخامت‌های زیاد و وجود برخی ناخالصی‌ها و نیز

جدول 4- جدول مقایسه‌ای عمق نفوذ پوشش بر اساس اندازه‌گیری و محاسبه ریاضی

تعداد دور چرخش آزمایشی سایشی Taber	آلیاژ 2024		آلیاژ 6061		آلیاژ 7075	
	$d_c / mm$	$d_m / mm$	$d_c / mm$	$d_m / mm$	$d_c / mm$	$d_m / mm$
10000	3/5	5/8	1/8	2/7	2/3	4/5
20000	5/7	8/5	3/4	4/6	3/8	6/3
30000	8/2	11/0	4/8	6/8	5/7	8/5
40000	11/1	13/8	6/3	8/1	7/4	10/2
50000	13/2	16/1	7/7	9/4	9/0	11/5
60000	15/7	18/3	9/3	10/7	10/9	13/3
70000	17/6	19/9	10/8	12/1	12/4	14/8
80000	19/8	22/3	12/3	13/8	14/0	16/2
90000	21/8	24/2	13/6	15/0	15/8	17/9
100000	23/6	25/8	14/9	16/1	18/1	20/4

$d_c$ : عمق نفوذ محاسبه شده بر اساس وزن کاهش یافته

$d_m$ : عمق نفوذ پوشش که با ضخامت‌سنج تعیین شده است

### بررسی مقاومت به سایش نمونه‌های آندایزینگ سخت با آب‌بندی

در این قسمت نمونه‌های آندایز شده ابتدا آب‌بندی شده، سپس مورد بررسی آزمون سایش قرار گرفتند. محلول آب‌بندی،

نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی پوشش نمونه‌های آندایزینگ سخت آب‌بندی شده با نتایج نمونه‌های بدون آب‌بندی (جداول 6، 7 و 8) مشخص می‌شود که با انجام عملیات آب‌بندی، سختی پوشش‌ها در تمامی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. البته مقدار کاهش میکروسختی نمونه‌ها زیاد نیست، این مسئله نشان‌دهنده ماهیت سخت پوشش آندی سخت و چگالی بالای آنها است که با وجود آب‌بندی کردن هم مقدار میکروسختی نمونه‌ها کاهش زیادی پیدا نکرده است.

جدول 6- نتایج آزمون میکروسختی پوشش‌های آندایزینگ سخت با ضخامت‌های مختلف بر روی نمونه‌های آلیاژی 2024-T3

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$ ( $H_{R.C}$ )
2024-T3	2/6	25	412 (42)
		50	485 (48)
		64	500 (49)
		76	488 (48)
		100	476 (47)
	3/2	25	402 (41)
		50	480 (48)
		64	492 (49)
		76	484 (48)
		100	469 (47)

جدول 7- نتایج آزمون میکروسختی پوشش‌های آندایزینگ سخت با ضخامت‌های مختلف بر روی نمونه‌های آلیاژی 6061-T6

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$ ( $H_{R.C}$ )
6061-T6	2/6	25	532 (52)
		50	570 (54)
		64	596 (55)
		76	590 (55)
		100	576 (54)
	3/2	25	526 (52)
		50	568 (54)
		64	592 (55)
		76	587 (55)
		100	566 (54)

عدم پیوستگی در پوشش باشد. همچنین با بررسی نتایج جدول‌های شماره 6، 7 و 8 می‌توان پیش‌بینی کرد که بیشترین مقدار سختی در محدوده ضخامت پوشش از  $64\mu m$  تا  $76\mu m$  حاصل می‌شود. در واقع در این محدوده ضخامت لایه اکسیدی به میزان کافی افزایش یافته و پیوستگی و چسبندگی لایه اکسیدی نیز در وضعیت بهتری است. در ضخامت‌های کمتر از  $64\mu m$ ، کوچک بودن ضخامت لایه اکسیدی و در ضخامت‌های بیشتر از  $76\mu m$  نیز عدم یکنواختی و پیوستگی لایه اکسیدی سبب کاهش سختی سطحی در محدوده ضخامت پوشش بین  $64\mu m$  تا  $74\mu m$  حاصل می‌شود.

با بررسی نمونه‌های آلیاژی آندایز سخت شده، تحت دو چگالی جریان مختلف  $2/6 A/dm^2$  و  $3/2 A/dm^2$  مشخص می‌شود که در تمامی نمونه‌های آلیاژی، نمونه‌هایی که تحت چگالی جریان  $2/6 A/dm^2$  آندایز شده‌اند سختی سطحی بالاتری دارند. این موضوع می‌تواند به دلیل تشکیل لایه اکسیدی با خلوص، یکنواختی و پیوستگی بهتر باشد.

با بررسی نتایج اندازه‌گیری میکروسختی نمونه‌های آندایز سخت‌شده آلیاژهای 2024، 6061، و 7075 از جدول‌های 6، 7 و 8 مشخص می‌گردد که در ضخامت‌های پوشش یکسان، مقدار افزایش سختی نمونه آلیاژی 6061 از همه بیشتر و افزایش سختی نمونه آلیاژی 2024 نسبت به دو نوع نمونه دیگر کمتر بوده است. برای مثال با اعمال پوشش آندایزینگ سخت به ضخامت  $64\mu m$  تحت چگالی جریان  $2/6 A/dm^2$ ، مقدار افزایش سختی در آلیاژ 2024،  $500Hv$ ، برای آلیاژ 6061،  $596Hv$  و در آلیاژ 7075 برابر با  $546Hv$  می‌باشد. دلیل افزایش بیشتر سختی در آلیاژهای 6061 و 7075 نسبت به 2024 تشکیل لایه کامل‌تر، یکنواخت‌تر و با چگالی بیشتری است. آلیاژهای گروه 2000 آلومینیوم که بیشتر از 5% مس (Cu) دارند در ضخامت‌های بالا پوشش اکسیدی را به راحتی قبول نمی‌کنند و در ترکیب لایه اکسیدی آنها مقداری غیر یکنواختی ساختاری وجود دارد که سبب کاهش سختی سطحی می‌شود.

**بررسی سختی نمونه‌های آندایزینگ سخت با آب‌بندی**  
 نتایج آزمون میکروسختی نمونه‌های آندایزینگ سخت‌شده با آب‌بندی در جداول 10، 11 و 12 نشان داده شده‌اند. با مقایسه

جدول 11- نتایج آزمون میکروسختی نمونه آندایز سخت شده و آببندی شده 6061-T6

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$
6061-T6 آندایزینگ سخت و آببندی شده	2/6	25	522
		50	559
		64	583
		76	576
		100	555
3/2	25	512	
	50	556	
	64	579	
	76	570	
	100	549	

جدول 8- نتایج آزمون میکروسختی پوشش‌های آندایزینگ سخت با ضخامت‌های مختلف بر روی نمونه‌های آلیاژی 7075-T6

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$ ( $H_{R.C}$ )
7075-T6	2/6	25	500 (49)
		50	533 (51)
		64	546 (52)
		76	542 (52)
		100	526 (51)
	3/2	25	490 (49)
		50	530 (51)
		64	542 (52)
		76	538 (52)
		100	520 (51)

جدول 12- نتایج آزمون میکروسختی نمونه آندایز سخت شده و آببندی شده 7075-T6

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$
7075-T6 آندایزینگ سخت و آببندی شده	2/6	25	488
		50	523
		64	532
		76	530
		100	512
3/2	25	478	
	50	519	
	64	530	
	76	525	
	100	507	

جدول 9- نتایج آزمون میکروسختی آلیاژهای 2024، 6061 و 7075

جنس نمونه آلیاژی	مقدار سختی بر حسب HB (Hv)
2024-T3	120 HB (128 Hv)
6061-T6	95 HB (100 Hv)
7075-T6	150 HB (158 Hv)

جدول 10- نتایج آزمون میکروسختی نمونه آندایز سخت شده و آببندی شده 2024-T3

جنس نمونه آلیاژی	چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	ضخامت پوشش ( $\mu m$ )	میکروسختی $H_V$
2024-T3 آندایزینگ سخت و آببندی شده	2/6	25	408
		50	478
		64	493
		76	481
		100	476
3/2	25	395	
	50	473	
	64	485	
	76	476	
	100	452	

### بررسی تغییر ابعاد

بر اساس فرمول‌های 2 و 3 و محاسبات انجام شده، مقادیر درصد افزایش ابعاد نمونه‌های آندایز سخت شده در جداول 13 آورده شده است.

افزایش ابعاد واقعی نمونه‌های آلومینیومی آندایز شده بر اساس فرمول 4 محاسبه می‌شوند [10].

$$(4) \quad \text{ضخامت پوشش} \times (\text{درصد افزایش ابعاد}) = D = \text{افزایش ابعاد}$$



### نتیجه گیری نهایی

نتایج حاصل از آزمون‌های سایش، سختی و تغییر ابعاد، بر روی نمونه‌هایی از انواع آلیاژهای آندایزینگ سخت‌شده 7075، 2024 و 6061 به صورت زیر خلاصه می‌شود:

1- با انجام عملیات آببندی در محلول استات نیکل داغ، مقاومت به سایش نمونه‌های آندایز سخت‌شده کاهش می‌یابد.

2- با افزایش ضخامت پوشش آندایز تا  $76 \mu\text{m}$ ، میکروسختی افزایش می‌یابد و افزایش ضخامت بیشتر سبب کاهش میکروسختی می‌شود.

3- میکروسختی آلیاژ آندایز شده 6061 نسبت به دو آلیاژ 2024 و 7075، بیشترین مقدار و آلیاژ 2024 کمترین مقدار را دارد.

4- نمونه‌هایی که تحت چگالی جریان  $\frac{A}{dm^2}$  2/6 آندایز می‌شوند، میکروسختی بیشتری نسبت به آندایز در چگالی جریان  $\frac{A}{dm^2}$  3/2 دارند.

5- با انجام عملیات آندایزینگ سخت، به اندازه نصف ضخامت پوشش، ابعاد نمونه افزایش می‌یابد.

### تقدیر و تشکر

از زحمات مسئولان محترم دانشگاه صنعتی مالک اشتر و سازمان صنایع دریایی به دلیل حمایت مالی پروژه و تکنسین‌های آزمایشگاه صنایع الکترونیک شیراز به دلیل همکاری در انجام آزمون‌های مذکور کمال تشکر و قدردانی را داریم.

### منابع و مراجع

- [1] Cutler, J., Liber, J., "Understanding aircraft structures", Black Well Publishing, 2005.
- [2] Drafting Room Manual, Textron Bell Helicopter STD, Section 11, Material Specification, 800-805, 1970.
- [3] Merati, A., "A study of nucleation and fatigue behavior of an aerospace aluminum alloy", 2024-T3, International Journal of Fatigue, 27, 33-44, 2005.
- [4] Merati, A., Graeme, E., "Determination of fatigue related discontinuity state of 7000 series of aerospace aluminum alloys", Engineering Failure Analysis 14 673-685, 2007.

به عنوان مثال برای محاسبه افزایش واقعی ابعاد نمونه آلیاژی T6-7075 در حالتی که نمونه برای رسیدن به ضخامت 50  $\mu\text{m}$  تحت عملیات آندایزینگ سخت با چگالی جریان  $4/3 A/dm^2$  قرار گرفته است، افزایش ابعاد آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$50 \mu\text{m} = 25 \times 2 = \text{افزایش ابعاد کل} \rightarrow 25 \mu\text{m} = 49\% \times 50$$

مکانیزم آندایزینگ پیچیده است. تشکیل فیلم اکسیدی و رشد آن در ضمن انجام عملیات آندایزینگ نوعی موازنه مابین تشکیل فیلم و حل شدن آن در الکترولیت اسیدی به وجود می‌آورد. فیلم اکسیدی در فصل مشترک آلومینیوم/اکسید آلومینا تشکیل می‌شود و فیلم به طور مؤثری به سمت بیرون فصل مشترک و نفوذ به سمت داخل فصل مشترک رشد می‌کند. در همین زمان، فیلم اکسیدی که در سطح بیرونی شکل گرفته در تمامی مدت زمان عملیات آندایزینگ در تماس با محلول الکترولیت است و می‌تواند به وسیله محلول الکترولیت حل شود. به طور مداوم تغییرات ابعاد تحت تأثیر تشکیل فیلم اکسیدی و حل شدن آن در سطح خارجی می‌باشد.

با توجه به جدول 13 مشخص است که در اثر ثابت گرفتن عوامل مختلف و تغییر چگالی جریان در طی عملیات آندایزینگ سخت، تغییر زیادی در افزایش ابعاد قطعه آندایز سخت‌شده به وجود نمی‌آید و در انجام عملیات آندایزینگ سخت، به راحتی می‌توان با چگالی جریان‌های مختلف به تلورانس و افزایش ابعادی مورد نظر دست پیدا کرد. با انجام عملیات آندایزینگ سخت، به اندازه نصف ضخامت پوشش، ابعاد نمونه افزایش می‌یابد. البته در چگالی جریان‌های بالاتر به عدد تلورانس دقیق (50% ضخامت پوشش) نزدیک تر می‌شویم.

جدول 13- درصد افزایش ابعاد سطح نمونه‌های آلومینیوم آندایزینگ سخت‌شده نوع (III)

چگالی جریان $\frac{A}{dm^2}$	مقدار محاسبه شده D		
	2024- T6	6061-T6	7075-T6
4/3	51	50	49
3/2	50	50	50
2/6	49	49	48

- [13] Aerts, T., Dimogerontakis, Th., "Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film", Surface & Coatings Technology 201, 7310-7317, 2007.
- [14] Shih, H., Tzou, S.L., "Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current", Surface and Coatings Technology, 124, 278-285, 2000.
- [15] Forn, A., Picas, J.A., Baile, M.T., "Microstructure and tribological properties of anodic oxide layer formed on al-si alloy produced by semisolid processing", Surface & Coatings Technology, 202, 1139-1143, 2007
- [16] Vrublevsky, I., Parkoun, V., "The study of the volume expansion of aluminum during porous oxide formation at galvanostatic regime", Applied Surface Science, 222, 215-225, 2004.
- [17] Budinski, Kenneth, G., "Engineering materials properties and selection, Reston publishing company", Inc. A Prentice-Hall Company Reston, Virginia 22090, 1983.
- [18] King, R.G, "Surface treatment and finishing of aluminium", King-oxford, Pergamon, 1988.
- [5] MONSALVE1, A., P´AEZ2, M.OLEDANO4, "S-N-P curves in 7075 T7351 and 2024 T3 aluminium alloys subjected to surface treatments", 2007, The Authors. Journal compilation c\_2007 Blackwell Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct 30, 748-758
- [6] Siva, C., Kumar, a., Mayanna, S.M., "Studies on white anodizing on aluminum alloy for space applications", Applied Surface Science 151, 280-286, 1999.
- [7] Cirik, E., Genel, K., "Effect of anodic oxidation on fatigue performance of 7075-T6 alloy", Surface & Coatings Technology 202, 5190-5201, 2008.
- [8] Sadeler, R., "Effect of a commercial hard anodizing on the fatigue property of a 2014-T6 aluminium alloy", J Mater Sci 41:5803-5809, 2006.
- [9] TZOU, R.J., SHIH, H.C., "Production and characterization of the anodic film on al-6%Zn-1%Mg alloy", Surface and Coating Technology, 34, 231-241, 1988.
- [10] Surface Engineering, Vol.5, 9th ed, Metals Handbook, American Society for Metals, Metals Park, ohio, 1990.
- [11] Caning, W., The Caning Handbook on Electroplating, 22thed, Birmingham, 1978.
- [12] Josep, A., Picas, Forn, A., "Hard anodizing of aluminium matrix composite a6061/(al2O3)p for wear and corrosion resistance improvement", Plasma Process. Polym., 4, S579-S583, 2007.