

اثر کشش سطحی محیط مایع بر بازدهی فرایند ساخت نانو-پوسته‌های

دی‌سولفیدمولیبدن با استفاده از پروب فراصوت

رضا افضل‌زاده

دانشیار، گروه ماده چگال دانشکده فیزیک،

دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

afzalzadeh@kntu.ac.ir

نجمه‌السادات تقوی*

دکترای فیزیک از گروه ماده چگال دانشکده فیزیک،

دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

najmehtaghavi80@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

چکیده

در این مقاله، نانو پوسته‌های دو بعدی دی‌سولفیدمولیبدن^۱ (MoS_2) با استفاده از یک پروب فراصوت در محیط‌های گوناگون مایع تولید شده‌اند. به علت اثر کلیدی کشش سطحی در فرایند پوسته‌سازی و نیز به‌منظور کاهش آثار منفی پسماندهای آزمایش بر محیط زیست، از محلولی استفاده شد که از ترکیب آب و اتانول با نسبت حاصل از رابطه اختلاط کانورس-رایت تشکیل شده است. نتایج طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی نشان می‌دهد که با استفاده از محلول مذکور، در مقایسه با سایر مایعات مورد آزمایش، بهترین بازدهی یا به‌عبارتی کمترین ضخامت برای پوسته‌ها حاصل می‌شود. تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری و نتایج حاصل از پراش پرتو X از نمونه‌ای که بهترین نتیجه طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی را نشان داده است، نیز شواهدی بر موفقیت فرایند پوسته‌سازی و تولید تک‌لایه‌های دی‌سولفیدمولیبدن هستند.

واژگان کلیدی: پروب فراصوت، نانو پوسته‌های MoS_2 ، کشش سطحی، رابطه کانورس-رایت، ضخامت لایه‌های دو

بعدی

۱. مقدمه

است. در جریان این پدیده، در اثر تمرکز فوق‌العاده انرژی، گرما و فشار موضعی زیادی (تقریباً 5000K و حدود 1000atm) ایجاد می‌شود. این شرایط، به همراه تولید موج ضربه‌ای، امکان منحصربه‌فردی برای اندرکنش ماده و انرژی، از جمله تولید نانومواد دو بعدی، فراهم می‌کند [۲-۴]. از جمله نانومواد که گروه‌های پژوهشی بسیاری در سراسر جهان به روش‌های گوناگون آن را تولید و مشخصه‌یابی

تابش امواج فراصوت سبب نتایج میکروساختاری متنوعی می‌شود که به شکل پدیده‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی بروز می‌کند [۱]. یکی از این پدیده‌ها که هنگام تابش فراصوت بر مواد در محیط‌های مایع رخ می‌دهد، کاواک‌زایی^۲ صوتی نام دارد، که عبارت از تشکیل، رشد تدریجی، نوسان و فروریزش حباب‌ها در نتیجه افت‌وخیز فشار در یک مایع

می‌کنند، دی‌سولفیدمولیبدن (MoS_2)، یکی از اعضای خانواده دی‌کالکوژنایدیهای فلزات واسطه^۳ (به‌اختصار TMDCها) است. در هر ورقه از این مواد، اتم‌ها پیوندهای نسبتاً قوی کووالانسی دارند، درحالی‌که نیروی بین صفحه‌های مجاور از نوع برهم‌کنش‌های ضعیف وان‌دروالس است. این ویژگی مهم به این مواد قابلیت لایه‌لایه شدن و ایجاد صفحات دو بعدی را می‌دهد [۵]. تک‌لایه‌ی دی‌سولفیدمولیبدن نیمه رساناست و گاف انرژی آن در حالت توده، غیرمستقیم و در حدود 1.2 eV و در حالت تک‌لایه، مستقیم و در حدود 1.8 eV است. به‌عبارت‌دیگر، گاف انرژی این ماده به ضخامت آن بستگی دارد [۶]. این ماده لایه‌ای، همانند سایر مواد دو بعدی، در حوزه‌های گوناگونی از جمله الکترونیک، اپتوالکترونیک و مکانیک کاربردهای گسترده‌ای دارد [۷].

یکی از روش‌های تولید نانومواد دو بعدی از مواد لایه‌ای، استفاده از پروب فراصوت در محیط مایع است. این روش را به اصطلاح پوسته‌سازی در فاز مایع^۴ می‌گویند که فرایندی نسبتاً ساده، سریع و با هزینه و آلاینده‌ی اندک است [۸-۶]. پوسته‌سازی به کمک فراصوت با نیروهای برشی هیدرودینامیک مربوط به کاواک‌زایی کنترل می‌شود. پس از پوسته‌سازی، اندرکنش مایع-پوسته به ایجاد تعادل بین نیروهای جاذبه بین ورقه‌ای نیاز دارد. مطلوب‌ترین محلول‌ها برای این منظور، محلولی است که کشش سطحی بین محیط مایع و پوسته‌های دو بعدی را به حداقل برساند.

در کل، هنگامی که یک سطح جامد در یک محیط مایع غوطه‌ور است، کشش سطحی (معمولاً برحسب mN/m) نقشی کلیدی را بازی می‌کند. هر چه کشش سطحی بیشتر باشد، امکان پخش شدن جامد در مایع ضعیف‌تر است و پوسته‌ها تمایل پیدا می‌کنند که به هم بچسبند و چسبندگی (هم‌چسبی) بین آنها، یعنی انرژی مورد نیاز در واحد سطح برای جلوگیری از تماس دو سطح، زیاد است و مانع پخش شدن پوسته‌ها در مایع می‌شود.

مایعات با کشش سطحی در حدود $\gamma = 40 \text{ mN/m}$ بهترین محلول برای پخش و تفکیک پوسته‌های MoS_2 است، زیرا در این صورت کشش سطحی بین محلول و پوسته‌ها کمینه می‌شود [۹-۸].

در این تحقیق، پوسته‌های دو بعدی MoS_2 از طریق تاباندن امواج فراصوت بر پودر دی‌سولفیدمولیبدن در محلول‌های گوناگون تهیه شدند. اثر کشش سطحی مایعات مورد استفاده بر ضخامت نانو لایه‌های دو بعدی تولید شده در اثر تابش فراصوت با استفاده از طیف‌سنجی فرابنفش- مرئی انجام شده با طیف‌سنج مدل (Perkin-Elmer Lambda 25)، میکروگراف‌های حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Philips XL30) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM, TESCAN mira3 (15kv)) و ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل (TEM, Zeiss EM900 (80kv)) و طیف XRD^5 حاصل از طیف‌سنج X'Pert PRO MPD PANalytical مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. روش تحقیق

همه نمونه‌ها از طریق تابش امواج فراصوت با استفاده از یک پروب تیتانیومی با قطر نوک 14 میلی‌متری مدل (FAPAN400R, 23kHz, 400W) بر 0.1 گرم پودر دی‌سولفیدمولیبدن در 60 سی‌سی محلول تهیه شدند. توان پروب، 50% (معادل 65 وات)، درصد پالس آن 50% و کل مدت زمان تابش مؤثر بر هر نمونه یک ساعت بوده است. به‌منظور مطالعه اثر کشش سطحی محیط مایع، از مایعات گوناگونی شامل آب دیونیزه، اتانول، ترکیب آب و اتانول، دی‌متیل‌فرامید^۶ (DMF) و دی‌متیل‌سولفوکساید^۷ (DMSO) استفاده شد. مقدار کشش سطحی مایعات مورد استفاده در دمای اتاق در جدول ۱ آمده است. برای جلوگیری

از گرم شدن و تبخیر محلول، بشر مورد استفاده در حمام آب- یخ قرار داده شد.

جدول ۱. مقادیر کشش سطحی محلول‌های مورد استفاده

محلول	γ کشش سطحی (mN/m)
اتانول	۲۲
محلول آب و اتانول شماره ۱	۲۷
DMF	۳۷
محلول آب و اتانول شماره ۲	۴۰
DMSO	۴۳
آب دیونیزه	۷۲

همان‌طور که گفته شد، به علت اثر کلیدی کشش سطحی در فرایند پوسته‌سازی، انتخاب محلول مناسب به‌عنوان بستر انجام این آزمایش‌ها بسیار حائز اهمیت است. بنابراین محلولی باید مورد استفاده قرار گیرد که به تنهایی کشش سطحی نزدیک به ۴۰ mN/m داشته باشد و یا اگر از محلول ترکیبی استفاده می‌شود، نسبت اجزای محلول باید به‌گونه‌ای باشد که این مهم را برآورده کند. از سوی دیگر، به‌منظور کاهش آثار منفی پسماندهای آزمایش بر محیط زیست تصمیم گرفتیم که آزمایش‌ها در حد امکان در حوزه به اصطلاح شیمی سبز انجام گیرد.

با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۱، از بین مایعات فوق، مقدار کشش سطحی ترکیبات آلی DMF و DMSO به مقدار مطلوب ۴۰ mN/m نزدیک است اما سمی بودن این دو حلال در برخی منابع تأیید شده است [۱۱-۱۰]. به‌علاوه، این دو حلال نقطه جوش به نسبت بالایی دارند و به راحتی از پوسته‌های تولید شده جدا نمی‌شوند و این در مراحل بعدی شامل جداسازی و انتقال پوسته‌ها مشکل‌ساز خواهد بود.

از سوی دیگر، در مراجع گوناگون اثبات شده است که آب سبزترین حلال (از نظر آلاینده نبودن برای محیط زیست) است [۱۲] و اتانول نیز یک الکل ساده و سبز است [۱۳]. اما از آب و یا اتانول به تنهایی نمی‌توان در آزمایش‌های

پوسته‌سازی استفاده کرد. زیرا کشش سطحی آب خالص در حدود ۷۲ mN/m و کشش سطحی اتانول خالص در حدود ۲۲ mN/m است. این ارقام با کشش سطحی مطلوب برای آزمایش‌های پوسته‌سازی بسیار متفاوت هستند. لذا از ترکیب آب و اتانول برای ساخت محلول مناسب استفاده شد. مزایای دیگر این انتخاب عبارتند از: ارزان بودن، در دسترس بودن، سمی نبودن و آسیب کمتر به سلامتی آزمایشگر.

جهت تخمین کشش سطحی ترکیبات دو جزئی، روابط گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف به کار گرفته شده است. ساده‌ترین رابطه که براساس درصد حجمی اجزای محلول تنظیم شده است، عبارت است از:

$$\gamma = \gamma_1 x_1 + \gamma_2 x_2 \quad (1)$$

که در آن، γ ، γ_1 و γ_2 ، به ترتیب، کشش سطحی ترکیب، کشش سطحی مایع اول و کشش سطحی مایع دوم و x_1 و x_2 به ترتیب، درصد حجمی مایع اول و مایع دوم در مخلوط هستند [۱۴]. با توجه به جدول ۱، محلول شماره ۱ با استفاده از این رابطه و با در نظر گرفتن آب به‌عنوان مایع اول (با $\gamma_1 = 72 \text{ mN/m}$) و اتانول به عنوان مایع دوم (با $\gamma_2 = 22 \text{ mN/m}$) ساخته شد. همچنین برای مقایسه و مطالعه بیشتر، برای ساخت محلول از رابطه دقیق‌تری موسوم به رابطه کانورس-رایت^۸ نیز استفاده شد که پیچیده‌تر از رابطه ۱ است، اما نتایج آن تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. این رابطه که براساس درصد مولی اجزای محلول تنظیم شده است [۱۵-۱۴]، عبارت است از:

$$\gamma = \gamma_1 - [1 + \frac{bx_1}{1-ax_1}] x_2 (\gamma_1 - \gamma_2) \quad (2)$$

که در آن، γ ، γ_1 و γ_2 ، به ترتیب، کشش سطحی ترکیب، کشش سطحی مایع اول و کشش سطحی مایع دوم و x_1 و

بهترین نتیجه را نشان داد، آزمون XRD به عمل آمد و تصویربرداری میکروسکوپی SEM، FESEM و TEM صورت گرفت.

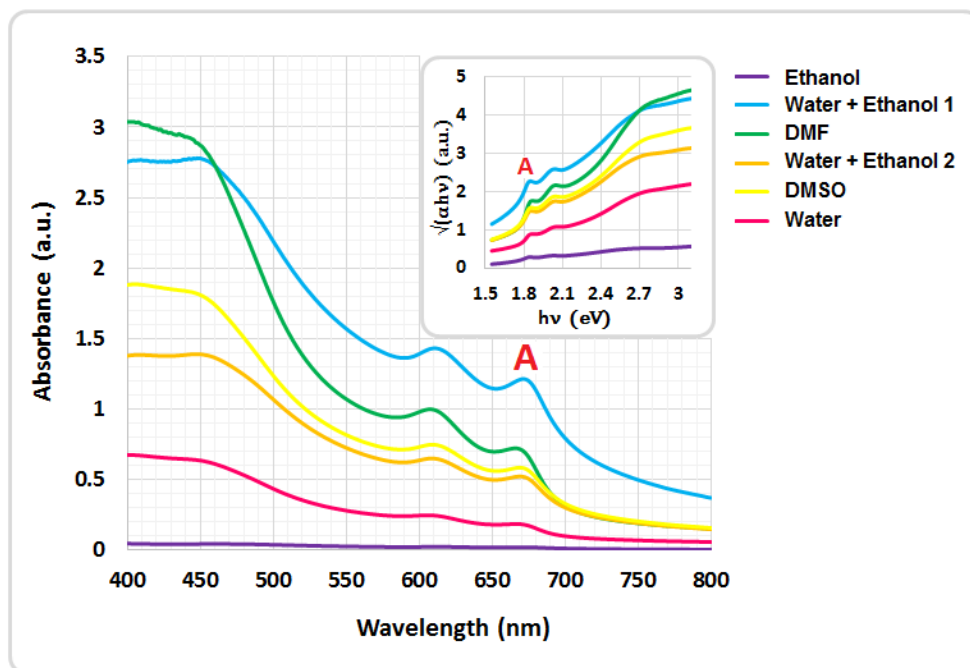
۳. نتایج و بحث

طیف‌های حاصل از طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی برای محلول‌های گوناگون حاوی نانو-ورقه‌های MoS₂ در شکل ۱ نشان داده شده است

X₂ به ترتیب، کسر مولی مایع اول و مایع دوم در مخلوط، و a و b دو ثابت هستند [۱۵].

با شرایط مذکور، پس از محاسبات به نسبت طولانی برای دست یافتن به کشش سطحی ۴۰ mN/m برای محلول ترکیبی (آب + اتانول)، به مقدار X₁ و X₂، و در نتیجه به مقادیر مناسب برای حجم آب و اتانول دست یافتیم و در تهیه محلول ترکیبی از آن استفاده کردیم. این محلول را از این به بعد محلول آب و اتانول شماره ۲ می‌نامیم.

با استفاده از طیف‌سنج فرابنفش-مرئی، طیف جذب تابش UV-Visible برای هر نمونه به دست آمد و از نمونه‌ای که



شکل ۱. طیف‌های جذب مشخصه MoS₂ حاصل از طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی برای محلول‌های مورد آزمایش. شکل ضمیمه کوچک، عبارت از نمودارهای Tauc متناظر با طیف‌های جذب فرابنفش-مرئی است که برای هر محلول محاسبه و رسم شده است.

پیک A و روش Tauc برای تخمین گاف انرژی، این مقدار بر حسب الکترون‌ولت برای هر نمونه به دست آمد [۱۸]. نمودارهای Tauc برای نمونه‌های MoS₂ در گراف کوچک ضمیمه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. اساس تکنیک Tauc بر استفاده از رابطه بین انرژی فوتون یا پرتو فرودی (hν) و ضریب جذب اپتیکی (α) استوار است:

پیک اول این نمودار که با A مشخص شده است، مربوط به گذار اکسایتونی^۹ از لبه بالاترین تراز شکافته شده نوار ظرفیت به پائین‌ترین بخش نوار رسانش در نقطه K در منطقه بریلوئن در MoS₂ دو بعدی است. موقعیت پیک A (به‌طور غیرمستقیم)، مقیاسی از ضخامت پوسته‌ها (تعداد لایه‌ها) را در اختیار قرار می‌دهد [۱۶-۱۷]. برای محاسبه میانگین گاف انرژی پوسته‌های ساخته شده در هر محلول، با استفاده از

$$\sqrt{\alpha h\nu} = K (h\nu - E_g) \quad (3)$$

که α ضریب جذب، h ثابت پلانک، ν بسامد پرتو فرودی، E_g گاف انرژی و K یک ثابت مستقل از انرژی است. از ترسیم یک خط مماس بر نقطه عطف پیک A در نمودار $\sqrt{\alpha h\nu}$ بر حسب $h\nu$ ، مقدار گاف انرژی به تقریب محاسبه می‌شود [۱۹].

با تغییر نوع محلول و در واقع کشش سطحی محیط مایع، در شرایطی که سایر پارامترهای مؤثر مانند توان پروب، زمان تابش امواج فراصوت و غلظت ثابت نگه داشته شده‌اند، مقدار محاسبه شده برای گاف انرژی نمونه‌ها و طول موج پیک‌های A (در توان ۶۵ وات و با زمان تابش یک ساعت)، به ترتیبی که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، به‌دست آمده است:

جدول ۲. مقادیر گاف انرژی نمونه‌ها در توان ۶۵ وات و با زمان تابش یک ساعت

محلول	گاف انرژی (الکترون‌ولت) (eV)	طول موج پیک λ_A ، A (نانومتر) (nm)
اتانول	۱/۸۲	۶۷۲/۵
محلول آب و اتانول شماره ۱	۱/۸۲	۶۷۱/۳
DMF	۱/۸۳	۶۶۶/۲
محلول آب و اتانول شماره ۲	۱/۸۵	۶۶۶
DMSO	۱/۸۳	۶۶۸/۹
آب دیونیزه	۱/۸۳	۶۶۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه، یعنی نزدیک‌ترین مقدار برای گاف نواری به گاف تک لایه MoS_2 ، برای محلول شماره ۲ حاصل شده است. این نتیجه، از طرفی تأییدی بر این مطلب است که مناسب‌ترین مقدار برای کشش سطحی محلول مورد استفاده در فرایند

پوسته‌سازی، 40 mN/m است، و از سوی دیگر ثابت می‌کند که رابطه کانورس-رایت، مقدار درستی را برای کشش سطحی محلول ترکیبی دو جزئی در اختیار قرار می‌دهد. آزمون دیگر برای بررسی نتایج، تخمین تعداد لایه‌ها با استفاده از رابطه زیر است که یک رابطه تجربی - آماری است:

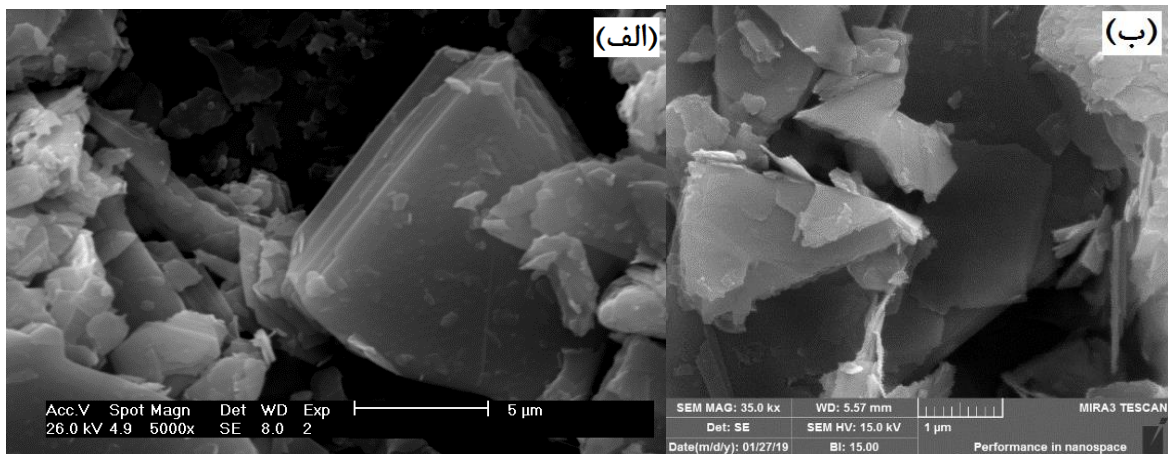
$$N = 2.3 \times 10^{36} e^{-54888/\lambda_A} \quad (4)$$

در اینجا N ، تعداد لایه‌ها و λ_A مقدار طول موج مربوط به پیک A (بر حسب نانومتر) است [۲۰]. با استفاده از این رابطه، تعداد لایه‌ها برای نمونه‌های مورد آزمایش به ترتیبی که در جدول ۳ مشاهده می‌شود به‌دست آمد:

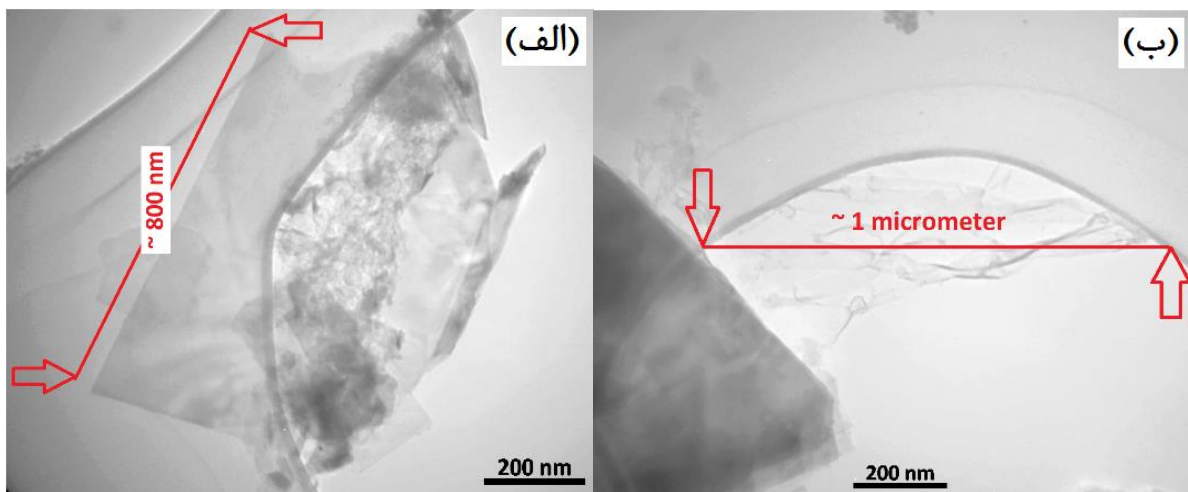
جدول ۳. متوسط تعداد لایه‌های پوسته‌های تولید شده در هر محلول.

محلول	تعداد لایه‌ها (N)
اتانول	۸
محلول آب و اتانول شماره ۱	۷
DMF	۴
محلول آب و اتانول شماره ۲	<۴
DMSO	>۵
آب دیونیزه	۵

همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، بهترین نتیجه (کمترین تعداد لایه‌ها) متعلق به نمونه تولید شده در محلول آب و اتانول ساخته شده با فرمول کانورس-رایت است. برای بررسی بیشتر، از پوسته‌های حاصل در محلول آب و اتانول شماره ۲، به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و نیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) میکروگراف‌هایی تهیه شد که به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ قابل مشاهده است.



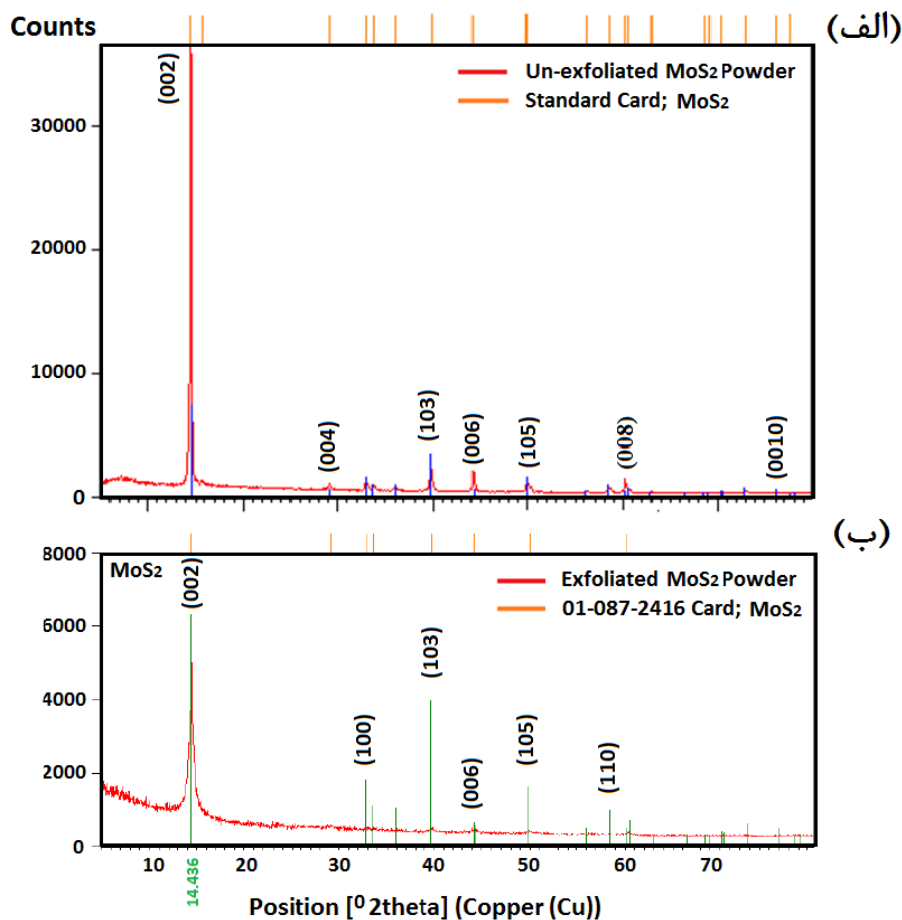
شکل ۲. (الف) میکروگراف SEM و (ب) میکروگراف FESEM از پوسته‌های MoS₂ تولید شده با استفاده از تابش فراسوت.



شکل ۳. (الف) و (ب) میکروگراف‌های TEM از پوسته‌های MoS₂ تولید شده با استفاده از تابش فراسوت.

پایه‌ها یا زیرلایه‌های مناسب منتقل یا لایه‌نشانی کرد و از آنها در ساخت انواع ابزارهای دقیق و سبک مانند دستگاه‌های (اپتو) الکترونیکی بهره گرفت. به علت نسبت بالای سطح به حجم مواد دو بعدی، آنها مناسب‌ترین گزینه برای تولید نسل جدیدی از حسگرها، سلول‌های خورشیدی، مدارهای الکترونیکی، آشکارسازها و سایر ابزارهایی هستند که کارایی آنها به‌طور مستقیم به سطح‌شان بستگی دارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ساختار لایه‌ای پوسته‌های MoS₂ در شکل ۲ به خوبی قابل مشاهده است. شکل ۳ نیز پوسته‌های بسیار نازک MoS₂ را که مساحت قابل توجهی (با ابعاد در حدود چند صد نانومتر) دارند، نشان می‌دهد. چنین پوسته‌هایی با ضخامت بسیار کم و مساحت زیاد، می‌توانند کاندید بسیار مناسبی برای انواع کاربردها باشند. زیرا در مرحله بعدی چنین پروژیهایی که فاز کاربردی است، می‌توان پوسته‌های تولید شده را به‌عنوان لایه حساس یا فعال روی



شکل ۴. طرح XRD از پوسته‌های MoS₂

تیزترین و پرشدت‌ترین پیک این نمودار، که پیک مربوط به صفحه بلوری (002) است، در زاویه $2\theta = 14.436^\circ$ ظاهر شده است که نشان‌دهنده تبلور با کیفیت خوب و ساختار لایه‌ای بی‌نقص است. پس از عملیات پوسته‌سازی، پهنای این پیک، افزایش و شدت آن، بسیار کاهش یافته است. پهن‌شدگی این پیک شاخص، به خوبی تولید نانوپوسته‌ها را اثبات می‌کند [۲۱-۲۲].

از طرفی، با استفاده از رابطه براگ^{۱۰} و نتایج XRD، فاصله بین صفحات اتمی (یعنی پارامتر شبکه یا d) برای پودر اولیه (توده MoS₂ پیش از تابش فراصوت)، $d1 = 6.11434 \text{ \AA}$ و برای نمونه بهینه، $d2 = 6.13067 \text{ \AA}$ به دست آمده است. افزایش $d2$ نسبت به $d1$ شاهد دیگری است که موفقیت روند پوسته‌سازی و

به‌منظور اطمینان بیشتر، طرح پراش پودر اولیه و نیز پوسته‌های تولید شده در محلول آب و اتانول شماره ۲، با استفاده از آزمون XRD به‌دست آمد. شکل ۴، الگوی پراش حاصل از طیف‌سنجی XRD برای این دو نمونه را نشان می‌دهد. در مقایسه با کارت استاندارد 01-087-2416، داده‌ها حاکی از آن است که نمونه دارای ساختار هگزاگونال با گروه فضایی P63/mmc و گروه نقطه‌ای D_{6h} است.

ظهور پیک‌های (001) شامل (002)، (004)، (006)، (008) و (0010) که در طیف‌های فوق شاهد آنها هستیم، مشخصه موادی است که دارای ساختار لایه‌ای هستند. با توجه به طرح الگوی پراش پرتو X که از پودر MoS₂ حاصل شده است، شاخص‌ترین یا به‌عبارتی

تولید نانوپوسته‌های دو بعدی را مجدداً تأیید می‌کند. [۲۱-۲۲].

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر تغییر کشش سطحی مایع بر ضخامت پوسته‌های دو بعدی MoS_2 ساخته شده با استفاده از امواج فراصوت بررسی شد. داده‌های حاصل از طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی نشان می‌دهد که در نمونه‌های ساخته شده با محلول شماره ۲ که کشش سطحی آن مناسب‌ترین

۵. مأخذ

مقدار برای پوسته‌سازی از MoS_2 است، پوسته‌های نازک‌تر و تک‌لایه‌های بیشتری تولید شده است. کیفیت و مساحت زیاد پوسته‌ها از طریق تصاویر حاصل از میکروسکوپ‌های الکترونی SEM، FESEM و TEM و فراوانی تک‌لایه‌ها از طریق طیف حاصل از آزمون پراش پرتو X (XRD) تأیید شده است.

- [۱] صادقی، م.، عبدالله، ا.، فلاحی آرزودار، ع. و عابدینی، ر.، "تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر فعال‌سازی، تحرک و چگالی نابجایی‌ها در مواد فلزی"، نشریه علمی صوت و ارتعاش، ۱۳۹۳، شماره ۶، دوره ۳، صفحه ۳۳-۴۶.
- [2] Pokhrel, N., Vabbina, P. K., and Pala, N., "Sonochemistry: Science and Engineering", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, Vol.29, pp.104-128. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.07.023>.
- [3] Bang, J. H., and Suslick, K. S., "Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials", *Adv. Mater*, 2010, Vol.22, pp. 1039-1059. <https://doi.org/10.1002/adma.200904093>.
- [۴] شاطرآبادی، د.، ابونجمی، م.، قربانی جاوید، م. و عرب حسینی، ا.، "مقایسه روش فراصوت با دیگر روش‌های نوین در استخراج عصاره گیاهان دارویی"، نشریه علمی صوت و ارتعاش، ۱۳۹۶، شماره ۱۲، دوره ۶، صفحه ۱۵-۳۰.
- [5] Han, Sang A., Ravi Bhatia, and Sang-Woo Kim. "Synthesis, properties and potential applications of two-dimensional transition metal dichalcogenides." *Nano Convergence*, 2016, Vol.2, no.1, pp.1-14. <https://doi.org/10.1186/s40580-015-0048-4>.
- [6] Backes C. et al., "Guidelines for Exfoliation, Characterization and Processing of Layered Materials Produced by Liquid Exfoliation", *Chemistry of materials*, 2017, vol.29, pp.243-255. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03335>.
- [۷] تقوی، ن. و افضل‌زاده، ر.، "اثر تغییرات توان تراگذار فرآوایی و زمان تابش امواج فرآوا بر ضخامت نانو-پوسته‌های دو-بعدی دی‌سولفیدمولیبدن ساخته‌شده به روش آوافیزیک"، *مجله علمی پژوهشی انجمن مهندسی صوتیات ایران*، ۱۳۹۸، شماره ۱، جلد ۷، صفحه ۵۰-۵۷.
- [8] Bonaccorso F., Lombardo A., Hasan T., Sun Z., Colombo L., and Ferrari C., "Production and Processing of graphene and 2d crystals", *Materials Today*, 2012, vol.15, no.12, pp.564-589. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(13\)70014-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(13)70014-2).
- [9] Jawaid A. et al., "Mechanism for Liquid-Phase exfoliation of MoS_2 ", *Chemistry of Materials*, 2016, vol.28, pp.337-348. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04224>.
- [10] Kim T. H., and Kim S. G., "Clinical Outcomes of Occupational Exposure to N, N-Dimethylformamide: Perspectives from Experimental Toxicology", *Safety and health at work*, 2011, vol.2, no.2, pp.97-104. <https://doi.org/10.5491/SHAW.2011.2.2.97>.
- [11] Galvao J., Davis B., Tilley M., Normando E., Duchon M. R., and Cordeiro M. F., "Unexpected low-dose toxicity of the universal solvent DMSO", *The FASEB Journal*, 2014, vol.28, no.3, pp.1317-1330. <https://doi.org/10.1096/fj.13-235440>.

- [12] Marcus Y., "Extraction by Subcritical and Supercritical Water, Methanol, Ethanol and Their Mixtures" *Separations*, 2018, vol.5, no.1, p.4. <https://doi.org/10.3390/separations5010004>.
- [13] Capello C., and Fischer U., "What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents", *Green Chemistry*, 2007, vol.9, no.9, pp.927-934. <https://doi.org/10.1039/B617536H>.
- [۱۴] میرزایی، ب.، "ارایه قانون اختلاط جدید برای پیش‌بینی کشش سطحی مخلوط‌ها"، نشریه علمی-پژوهشی شیمی و مهندسی شیمی / ایران، ۱۳۹۳، شماره ۲، دوره ۳۳، صفحه ۴۷-۵۳.
- [15] Connors K. A., and Wright J., "Dependence of Surface Tension on Composition of Binary Aqueous-Organic Solutions", *Analytical Chemistry*, 1989, vol.61, no.3, pp.194-198. <https://doi.org/10.1021/ac00178a001>.
- [16] Qiao W. et al., "Effects of ultrasonic cavitation intensity on the efficient liquid-exfoliation of MoS₂ nanosheets", *Rsc Advances*, 2014, vol.4, no.92, pp.50981-50987. <https://doi.org/10.1039/C4RA09001B>.
- [17] Vella, Daniele, Victor Vega-Mayoral, Christoph Gadermaier, Natasa Vujicic, Tetiana Borzda, Peter Topolovsek, Matej Prijatelj, Iacopo Tempra, Eva Arianna Aurelia Pogna, and Giulio Cerullo, "Femtosecond spectroscopy on MoS₂ flakes from liquid exfoliation: surfactant independent exciton dynamics", *Journal of Nanophotonics*, 2015, Vol.10, no.1, p.012508. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.10.012508>.
- [18] Zhu, Juntong, Jiang Wu, Yinghui Sun, Jianwen Huang, Yufei Xia, Hao Wang, Haibo Wang, Yun Wang, Qinghua Yi, and Guifu Zou. "Thickness-dependent bandgap tunable molybdenum disulfide films for optoelectronics." *RSC advances*, 2016, Vol.6, no.112, pp.110604-110609. <https://doi.org/10.1039/C6RA22496B>.
- [19] Tauc, J., and A. Menth, "States in the gap", *Journal of non-crystalline solids*, 1972, Vol.8, pp.569-585. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(72\)90194-9](https://doi.org/10.1016/0022-3093(72)90194-9)
- [20] Backes, Claudia, Ronan J. Smith, Niall McEvoy, Nina C. Berner, David McCloskey, Hannah C. Nerl, Arlene O'Neill et al., "Edge and confinement effects allow in situ measurement of size and thickness of liquid-exfoliated nanosheets", *Nature communications*, 2014, Vol.5, no.1, pp.1-10. <https://doi.org/10.1038/ncomms5576>
- [21] Liu, Y. D., L. Ren, X. Qi, L. W. Yang, G. L. Hao, J. Li, X. L. Wei, and J. X. Zhong, "Preparation, characterization and photoelectrochemical property of ultrathin MoS₂ nanosheets via hydrothermal intercalation and exfoliation route", *Journal of alloys and compounds*, 2013, Vol.571, pp.37-42. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.031>.
- [22] Tonndorf, P., Schmidt, R., Böttger, P., Zhang, X., Börner, J., Liebig, A., Albrecht, M., Kloc, C., Gordan, O., Zahn, D.R. and De Vasconcellos, S.M., 2013, "Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS₂, MoSe₂, and WSe₂", *Optics express*, 2013, Vol.21, no.4, pp.4908-4916. <https://doi.org/10.1364/OE.21.004908>.

1. Molybdenum disulfide
2. Cavitation
3. Transition Metal DiChalcogenides
4. Liquid Phase Exfoliation
5. X-Ray Diffraction
6. Dimethylformamide (DMF)
7. Dimethyl sulfoxide (DMSO)
8. Connors – Wright equation
9. Excitonic transitions
10. Bragg law