

خروج لیگاند سیانید از کمپلکس آنیونی سیکلومتاله شده پلاتین (II)

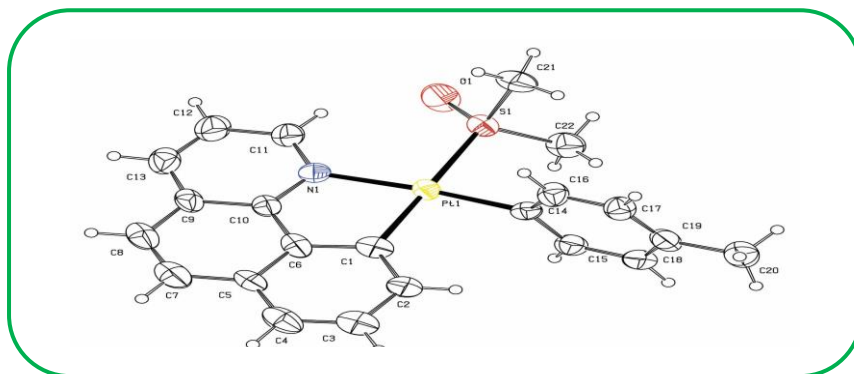
مینا صادقیان، محسن گلبن حقیقی*، ناصر صفری، بهروز نوتاش
دانشکده علوم شیمی و نفت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، کدپستی ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، ایران
ایمیل نویسنده مسئول: m_golbon@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۴ خرداد، ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲۱ فروردین، ۱۴۰۲

چکیده: از واکنش کمپلکس خنثی A، $[Pt(bzq)(Me)(SMe_2)]$ با یک اکی‌والان نمک پتاسیم سیانید در حلال متانول در دمای محیط، کمپلکس آنیونی سیکلومتاله ۱، $[Pt(bzq)(Me)(CN)]$ به دست آمد و از واکنش کمپلکس‌های A و B، $[Pt(bzq)(p-T)(SMe_2)]$ با یک اکی‌والان از نمک سدیم سیانید در حلال دی‌متیل سولفوکسید و سپس تعویض کاتیون از سدیم به تتراپوتیل آمونیوم، با استفاده از نمک تتراپوتیل آمونیوم پرکلرات، در نهایت کمپلکس‌های آنیونی سیکلومتاله ۲، $[NBu_4[Pt(bzq)(Me)(CN)]]$ و ۳، $[NBu_4[Pt(bzq)(p-T)(CN)]]$ تهیه شدند که در حلال‌های آلی رایج از قبیل استون، دی‌کلرومتان و کلروفرم محلول هستند. تمامی ترکیبات با استفاده از طیف‌سنجی رزونانس مغناطیس هسته پروتون (HNMR)، آنالیز عنصری (CHN) و طیف‌سنجی مادون قرمز (IR) شناسایی شدند. به منظور تهیه تک‌بلور، کمپلکس ۳ در حلال دی‌متیل سولفوکسید حل شد و محلول زرد رنگ تحت شرایط تبخیر آرام قرار گرفت که با گذشت زمان لیگاند سیانید با لیگاند DMSO تعویض شد و کمپلکس خنثی ۴، $[Pt(bzq)(p-T)(DMSO)]$ به دست آمد.

کلید واژه: کمپلکس‌های آنیونی سیکلومتاله پلاتین، لیگاند سیانید، ساختار تک‌بلور



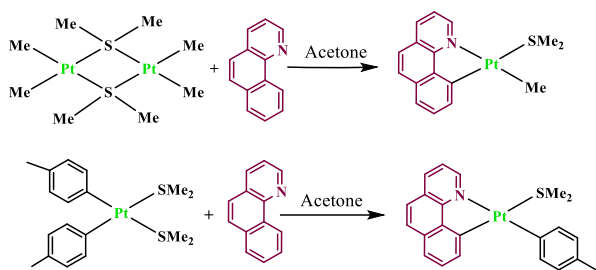
استفاده از لیگاند کمکی با قدرت میدان لیگاند قوی در کمپلکس‌های سیکلومتاله پلاتین (II) با خاصیت سیگما دهنده قوی منجر به افزایش سطح انرژی حالت‌های برانگیخته d-d می‌شود و فروپاشی سریع غیرتشنجی را سرکوب می‌کند. بنابراین قدرت میدان لیگاند بر شدت و بازده کوانتومی نشر اثر می‌گذارد [۱۴-۱۶]. علاوه بر این تشکیل ساختارهای پایدار و صلب با اثر کیلیت تقویت می‌شود [۱۷]. واکنش جاننشینی

۱- مقدمه

کمپلکس‌های سیکلومتاله پلاتین (II) به دلیل خواص نوری منحصر به فرد آن‌ها در بسیاری از زمینه‌ها از قبیل دیودهای نشر کننده نور [۱-۷]، سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ [۸]، تولید هیدروژن [۹]، حسگر شیمیایی [۱۰-۱۲] و تصویربرداری زیستی [۱۳]، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

طیف‌های NMR ترکیبات تهیه شده به‌وسیله‌ی دستگاه Bruker Avance DPX 300 MHz و با استفاده از استاندارد خارجی مرجع TMS در دمای اتاق ثبت شدند. جابجایی‌های شیمیایی (δ) و ثابت‌های جفت‌شدگی (J)، به‌ترتیب برحسب ppm و هرتز (Hz) بیان شدند. تجزیه‌ی عنصری ترکیبات تهیه شده با استفاده از دستگاه Thermofinigan CHNSO انجام شد.

کمپلکس‌های اولیه A، $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{SMe}_2)]$ و B، $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{p-T})(\text{SMe}_2)]$ براساس گزارش قبلی تهیه شد [۲۷]. روش کلی تهیه‌ی کمپلکس‌های پیش‌ماده در شمای ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: روش تهیه‌ی کمپلکس‌های A و B

۲-۲-۲- سنتز کمپلکس‌های پلاتین (II)

۲-۲-۲-۱- تهیه کمپلکس ۱، $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{CN})]$

به محلول کمپلکس A در حلال متانول (۱۵ میلی‌لیتر)، لیگاند سیانید اضافه گردید و مخلوط واکنش برای مدت ۲ ساعت در دمای محیط تحت چرخش قرار گرفت. حلال موجود در سوسپانسیون به کمک خلاء تبخیر شد و رسوب حاصل با n -هگزان (3×2 میلی‌لیتر) شست‌شده شد. در نهایت محصول سبز رنگی حاصل گردید که تحت خلاء خشک گردید. بازده این فرایند ۸۰٪ به‌دست آمد. داده‌های به‌دست آمده از روش‌های مختلف به‌شرح زیر می‌باشد:

Elem. Anal. Calcd. for $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{KN}_2\text{Pt}$ (454.45): C, 39.73; H, 2.45; N, 6.18. Found: C, 40.03; H, 2.52; N, 6.03.

IR (ν ($\text{C}\equiv\text{N}$), cm^{-1}): 2109.

^1H NMR [DMSO-d_6 , 298 K, δ]: 0.95 [s, 3H, $^2J_{\text{HPt}} = 88.15$ Hz, MePt], 9.50 [d, 1H, H_2 of bzq], other aromatic protons of the bzq ligand, 7.51-8.60.

۲-۲-۲-۲- تهیه کمپلکس ۲، $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{CN})]$

لیگاند در کمپلکس‌های فلزات واسطه معمولاً به‌عنوان یک مرحله کلیدی در بسیاری از واکنش‌های کاتالیزوری در نظر گرفته می‌شود. این واکنش‌ها جانشینی بر روی کمپلکس مربع مسطح پلاتین (II) به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸ و ۱۹]. این مطالعات نشان می‌دهد که این واکنش‌ها از طریق مکانیسم تجمعی پیش می‌رود. تا آن‌جا که ما می‌دانیم چنین واکنش‌هایی به‌ندرت بر روی کمپلکس‌های حاوی لیگاندهای حلقوی پلاتین (II) مطالعه شده است [۲۰ و ۲۱]. از طرفی شیمی کوردیناسیون دی‌متیل سولفوکسید با فلزات واسطه به‌عنوان یک موضوع قابل بحث، بررسی شده است. بسته به ماهیت فلز و سایر لیگاندهای کمکی متصل شده به فلز، دی‌متیل سولفوکسید می‌تواند به‌صورت انتهایی از سر اکسیژن یا گوگرد و یا به‌صورت پل عمل کند. این لیگاند در فلزات نرم از قبیل Ru^{II} , Rh^{I} , Os^{II} , Pt^{II} معمولاً از طریق گوگرد مثل کمپلکس $[\text{Pt}(\text{bpy})(\text{S-DMSO})\text{Cl}][\text{BF}_4]$ به مرکز فلزی متصل می‌شود، اما اتصال از طریق اکسیژن هم در کمپلکس‌هایی مانند $[\text{Rh}(\text{S-DMSO})_2(\text{O-DMSO})_2][\text{PF}_6]$ و $[\text{Pd}(\text{phen})(\text{O-DMSO})\text{Cl}][\text{PF}_6]$ مشاهده شده است [۲۲-۲۵].

در سری اسپکتروشیمیایی سیانید به‌عنوان یک لیگاند میدان قوی و با شکافتگی میدان بلور بالا منجر به تشکیل پیوند فلز-لیگاند قوی می‌شود. لیگاند سیانید سیگما دهنده‌ی قوی و پذیرنده‌ی پای نسبتاً خوب است که بسیاری از فلزات با اعداد اکسایش مختلف را پایدار می‌کند [۲۶].

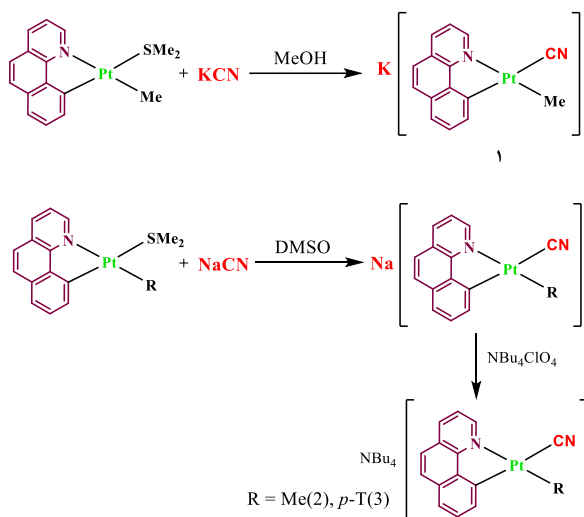
در این پژوهش کمپلکس‌های آنیونی تک هسته‌ای سیکلومتاله پلاتین (II) حاوی لیگاند سیانید انتهایی $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{CN})]$ ، $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{CN})](\text{NBu}_4)$ و $[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{p-T})(\text{CN})](\text{NBu}_4)$ تهیه شدند. به‌منظور بررسی واکنش جانشینی لیگاند دی‌متیل سولفوکسید با لیگاند سیانید، کمپلکس ۳ در مجاورت با حلال دی‌متیل سولفوکسید قرار گرفت و ساختار تک‌بلور آن به‌دست آمد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و دستگاه‌ها

مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت‌های سیگما-آلد ریچ و اکروس خریداری شدند و حلال‌های واکنش‌ها نیز بدون هیچ‌گونه خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

از قبیل CN^- می‌باشند. از این‌رو از آن‌ها برای ساخت کمپلکس‌های آنیونی ۱-۳ استفاده می‌شود. در این راستا کمپلکس‌های آنیونی با کاتیون همراه پتاسیم و تترابوتیل آمونیوم سنتز گردید. از واکنش کمپلکس A با یک اکی‌والان نمک پتاسیم سیانید در حلال متانول در دمای اتاق، کمپلکس آنیونی ۱ به دست آمد. در این کمپلکس لیگاند سیانید جایگزین لیگاند SMe_2 می‌شود. کمپلکس‌های آنیونی با کاتیون همراه تترابوتیل آمونیوم ۲-۳ با روشی مشابه تهیه شدند. بدین صورت که کمپلکس پیش ماده مربوطه و نمک سدیم سیانید با نسبت اکی‌والانی ۱:۱ در حلال دی‌متیل سولفوکسید (۲ میلی‌لیتر) حل شدند و در دمای اتاق به مدت دو ساعت چرخیدند. سپس یک اکی‌والان نمک تترابوتیل آمونیوم پرکلرات به آن اضافه گردید و به مدت یک ساعت چرخید. پس از آن حدود ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و با افزودن ۳۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان کمپلکس نهایی استخراج گردید (سه مرتبه تکرار شد). مخلوط حاوی دی‌کلرومتان استخراج شده و سه مرتبه با آب مقطر شسته شد. به منظور خشک کردن، نمک منیزیم سولفات بدون آب به مخلوط اضافه گردید و تحت خلاء حلال آن حذف شد و جامد زرد رنگ به دست آمد. شمایی از روش تهیهی کمپلکس‌های ۱-۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. ساختار کمپلکس‌های ۱-۳ با استفاده از روش طیف‌سنجی 1H NMR در حالت محلول و آنالیز عنصری در حالت جامد مورد شناسایی قرار گرفت.



شکل ۲: روش تهیهی کمپلکس‌های ۱-۳

در طیف 1H NMR کمپلکس ۱ (شکل ۳) در $DMSO-d_6$.

سدیم سیانید و کمپلکس A با نسبت اکی‌والانی یک در دی‌متیل سولفوکسید حل گردید و برای دو ساعت در دمای اتاق چرخید. سپس نمک NBu_4ClO_4 به مقدار یک اکی‌والان به محلول اضافه شد و مجدداً یک ساعت چرخیده شد. به مخلوط واکنش آب مقطر (۱۰۰ میلی‌لیتر) اضافه شد و با حلال دی‌کلرومتان (۲۰×۳ میلی‌لیتر) استخراج گردید. مخلوط حاوی دی‌کلرومتان با آب (۲۰×۳ میلی‌لیتر) شسته شد. لایه‌ی آلی با $MgSO_4$ بدون آب خشک و با کاغذ صافی صاف گردید. محلول آلی زرد رنگ در خلاء خشک شد و جامد زرد رنگ با بازده ۷۰٪ به دست آمد. داده‌های به دست آمده از روش‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد:

Elem. Anal. Calcd. for $C_{31}H_{47}N_3Pt$ (657.82): C, 56.69; H, 7.21; N, 6.40. Found: C, 57.09; H, 7.29; N, 6.24.

IR ($\nu(C\equiv N)$, cm^{-1}): 2091.

1H NMR [$DMSO-d_6$, 298 K, δ]: 9.49 [d, 1H, H_2 of bzq], other aromatic protons of the bzq ligand, 7.54-8.53. 3.15 [m, 8H, NCH_2 , NBu_4], 1.59 [m, 8H, $-CH_2-$, NBu_4], 1.28 [m, 8H, $-CH_2-$, NBu_4], 0.92 [t, 12H, $-CH_3$, NBu_4].

۲-۲-۳- تهیه کمپلکس ۳، $(NBu_4)[Pt(bzq)(p-T)(CN)]$

این ترکیب با روشی مشابه، روش سنتز کمپلکس ۲ ولی با استفاده از پیش ماده B با بازده ۷۰٪ تهیه شد. داده‌های به دست آمده از روش‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد:

Elem. Anal. Calcd. for $C_{37}H_{51}N_3Pt$ (734.93): C, 60.64; H, 7.01; N, 5.73. Found: C, 61.03; H, 7.08; N, 5.57.

IR ($\nu(C\equiv N)$, cm^{-1}): 2095.

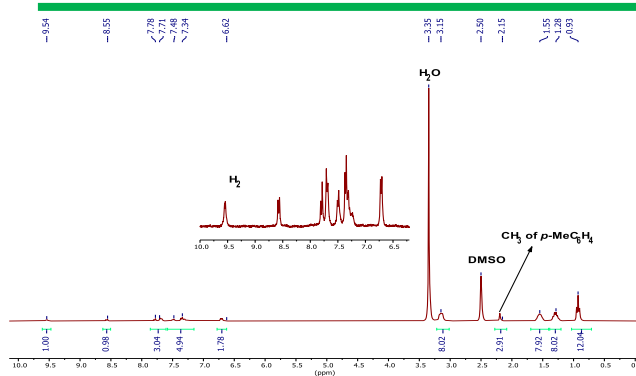
1H NMR [$DMSO-d_6$, 298 K, δ]: 2.15 [s, 3H, MeC], 9.54 [d, 1H, H_2 of bzq], other aromatic protons of the bzq and p-MeC₆H₄ ligands: 6.62-8.55, 3.15 [m, 8H, NCH_2 , NBu_4], 1.55 [m, 8H, $-CH_2-$, NBu_4], 1.28 [m, 8H, $-CH_2-$, NBu_4], 0.93 [t, 12H, $-CH_3$, NBu_4].

۳- بحث و نتیجه‌گیری

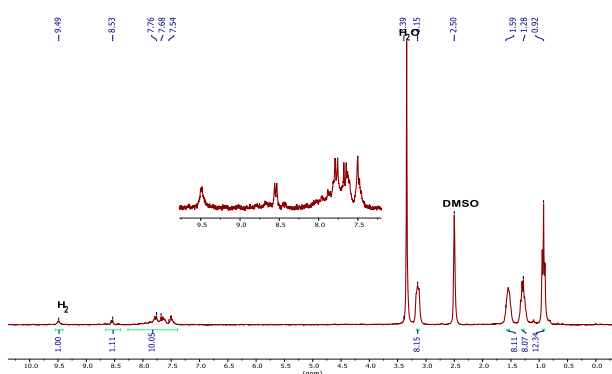
۱-۳- سنتز و شناسایی کمپلکس‌های آنیونی حاوی

لیگاندهای حلقوی پلاتین (II)

کمپلکس‌های A و B که حاوی لیگاند ترک‌کننده SMe_2 هستند گزینه‌ی مناسبی برای واکنش با بسیاری از نوکلئوفیل‌ها



شکل ۴: طیف HNMR کمپلکس
DMSO- d^6 در حلال $\text{NBu}_4[\text{Pt}(\text{bzq})(p\text{-T})(\text{CN})]$

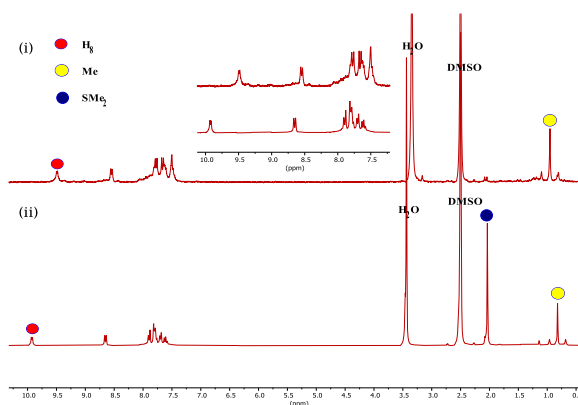


شکل ۵: طیف HNMR کمپلکس
DMSO- d^6 در حلال $\text{NBu}_4[\text{Pt}(\text{bzq})(\text{Me})(\text{CN})]$

۲-۳- ساختار تک بلور

به منظور تهیه تک بلور، کمپلکس ۳ به روش تبخیر آرام در حلال دی‌متیل سولفوکسید قرار گرفت. بعد از حل ساختار تک-بلور، در آن لیگاند کئوردینه شونده دی‌متیل سولفوکسید جایگزین لیگاند سیانید در کمپلکس آنیونی شد و در نهایت کمپلکس خنثی ۴، $[\text{Pt}(\text{bzq})(p\text{-T})(\text{DMSO})]$ مطابق ساختار شکل ۶ به دست آمد. با توجه با ساختار مربع مسطح کمپلکس ۳ می‌توان در نظر گرفت که احتمالاً واکنش جانشینی لیگاند از طریق فرآیند تجمعی ۱۸ الکترونی پیش می‌رود.

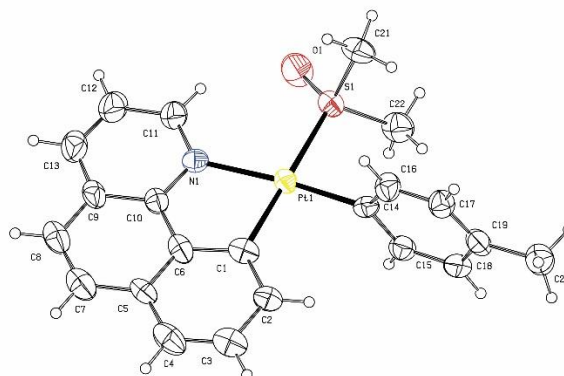
یک یک‌تایی همراه با پیک‌های اقماری پلاتین در ۹۵/۰ ppm δ با ثابت جفت‌شدگی $^2J_{\text{PtH}} = 88/15 \text{ Hz}$ مربوط به پروتون‌های گروه متیل متصل به هسته پلاتین می‌باشد که در مقایسه با کمپلکس پیش‌ماده به سمت میدان‌های پایین‌تر جابه‌جا می‌شود. سیگنال‌های موجود در محدوده $\delta = 7/51 - 8/60 \text{ ppm}$ مربوط به هیدروژن‌های لیگاند bzq می‌باشد. سیگنال مربوط به هیدروژن H^2 لیگاند bzq در $\delta = 9/50 \text{ ppm}$ به صورت پیک دوتایی ظاهر می‌شود که به سمت میدان‌های بالاتر در مقایسه با پیش‌ماده جابه‌جا می‌شود. طیف ATR یک پیک جذبی برای CN^- در 2109 cm^{-1} را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مقایسه طیف ^1H NMR کمپلکس ۱ با کمپلکس A در حلال DMSO- d_6

در طیف ^1H NMR کمپلکس ۳ (شکل ۴) در حلال DMSO- d^6 ، یک سیگنال یک‌تایی در $\delta = 2/16 \text{ ppm}$ مشاهده می‌شود که به پروتون‌های گروه متیل در لیگاند پاراتولیل نسبت داده می‌شود. سیگنال دوتایی در $\delta = 9/31 \text{ ppm}$ در ناحیه آروماتیک به پروتون مجاور اتم نیتروژن در لیگاند bzq مربوط می‌باشد که در مقایسه با کمپلکس پیش‌ماده به سمت میدان بالاتر جابه‌جا می‌شود. سیگنال‌های چندتایی در $1/30 \text{ ppm}$ ، $3/13$ ، $1/54$ و $\delta = 0/92 \text{ ppm}$ مشاهده می‌شود که به کاتیون تتراپتیل آمونیوم نسبت داده می‌شود. در طیف IR یک پیک جذبی مربوط به لیگاند سیانید در 2094 cm^{-1} ظاهر می‌شود.

F(000)	524
Crystal size	0.35 × 0.20 × 0.15 mm
θ range for data collection (°)	2.05 to 24.99
Index ranges	-10 ≤ h ≤ 10, -11 ≤ k ≤ 12, -13 ≤ l ≤ 13
Reflections collected / unique	6929 / 3289 [R(int) = 0.1282]
Completeness to theta = 24.99	99.7 %
Absorption correction	Numerical
Max. and min. transmission	0.3949 and 0.1759
Refinement method	Full-matrix least-squares on F ²
Data / restraints / parameters	3289 / 0 / 238
Goodness-of-fit on F ²	0.977
Final R indices [I > 2σ(I)] ^[a]	R1 = 0.0482, wR2 = 0.1008
R indices (all data) ^[a]	R1 = 0.0651, wR2 = 0.1058
Largest diff. peak and hole (e Å ⁻³) (dmin/dmax)	1.374 and -1.103
[a] R1 = $\sum (F_o - F_c) / \sum F_o $; wR2 = $[\sum w (F_o^2 - F_c^2)^2 / \sum w F_o^2]^{1/2}$; goodness of fit = $\{ \sum [w (F_o^2 - F_c^2)^2] / (N_{obs} - N_{param}) \}^{1/2}$; w = $[\sigma^2 (F_o) + (g1P)^2 + g2P]^{-1}$; P = $[\max(F_o^2; 0 + 2F_c^2) / 3]$.	



شکل ۶: ساختار بلوری کمپلکس ۴

طول پیوند و زوایای پیوندی کمپلکس ۴ در جدول ۱ قرار داده شده است. داده‌های بلوری و اصلاح ساختار کمپلکس [Pt(bzq)(p-T)(DMSO)] نیز در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: طول پیوند و زوایای پیوندی انتخاب شده برای کمپلکس

شماره ۴

پارامترها	[Pt(bzq)(p-T)(DMSO)]
Pt(1)-C(14)	2.027(9)
Pt(1)-C(1)	2.039(10)
Pt(1)-N(1)	2.138(8)
Pt(1)-S(1)	2.285(3)
C(14)-Pt(1)-C(1)	91.5(4)
C(14)-Pt(1)-N(1)	171.8(4)
C(1)-Pt(1)-N(1)	81.0(4)
C(14)-Pt(1)-S(1)	89.6(3)

۴- نتیجه‌گیری

کمپلکس‌های آنیونی سیکلومتاله پلاتین (II) حاوی لیگاند سیانید ۱-۳ در دمای محیط تهیه و با استفاده از روش‌های مختلف دستگاهی شناسایی شد. در این کمپلکس‌ها لیگاند SMe_2 به‌عنوان یک ترک شونده عمل می‌کند و با لیگاند سیانید جایگزین می‌شود. به‌منظور رشد تک‌بلور، کمپلکس ۳ به‌روش تبخیر در حلال دی‌متیل سولفوکسید قرار داده شد. از آن‌جایی‌که لیگاند دی‌متیل سولفوکسید خاصیت کئوردینه شونده خوبی دارد، بنابراین با گذشت زمان لیگاند سیانید با دی‌متیل سولفوکسید جایگزین می‌شود و کمپلکس خنثی به‌دست می‌آید.

سپاسگزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های

جدول ۲: داده‌های بلوری و اصلاح ساختار برای کمپلکس

[Pt(bzq)(p-T)(DMSO)]

Empirical formula	C ₂₂ H ₂₁ N O Pt S
Formula weight	542.54
Temperature	298(2) K
Wavelength	0.71073 Å
Crystal system	Triclinic
	a = 9.0267(18) Å
	α = 115.49(3) deg.
Unit cell dimensions	b = 10.460(2) Å
	β = 96.93(3) deg.
	c = 11.139(2) Å
	γ = 92.43(3) deg.
Volume	937.1(3) (Å) ³
Z, Calculated density	2, 1.923 Mg/m ³
Absorption coefficient (μ)	7.609 mm ⁻¹

- [17] K. Li, G.S. Ming Tong, Q. Wan, G. Cheng, W.-Y. Tong, W.-H. Ang, W.-L. Kwong, C.-M. Che, *Chem. Sci.*, 7 (2016) 1653-1673.
- [18] M. Rashidi, K. Kamali, M.C. Jennings, R.J. Puddephatt, *J. Organomet. Chem.*, 690 (2005) 1600-1605.
- [19] S. Jafar Hoseini, S. Masoud Nabavizadeh, S. Jamali, M. Rashidi, *J. Organomet. Chem.*, 692 (2007) 1990-1996.
- [20] A.I. Solomatina, P.S. Chelushkin, T.O. Abakumova, V.A. Zhemkov, M. Kim, I. Bezprozvanny, V.V. Gurzhiy, A.S. Melnikov, Y.A. Anufrikov, I.O. Koshevoy, S.-H. Su, P.-T. Chou, S.P. Tunik, *Inorg. Chem.*, 58 (2019) 204-217.
- [21] S.M. Nabavizadeh, H. Amini, H.R. Shahsavari, M. Namdar, M. Rashidi, R. Kia, B. Hemmateenejad, M. Nekoeinia, A. Ariaifard, F.N. Hosseini, A. Gharavi, A. Khalafi-Nezhad, M.T. Sharbati, F. Panahi, *Organometallics*, 30 (2011) 1466-1477.
- [22] M. Calligaris, O. Carugo, *Coord. Chem. Rev.*, 153 (1996) 83-154.
- [23] M. Calligaris, *Coord. Chem. Rev.*, 248 (2004) 351-375.
- [24] R. Dorta, H. Rozenberg, D. Milstein, *Chem. Commun.*, (2002) 710-711.
- [25] G. Annibale, L. Cattalini, V. Bertolasi, V. Ferretti, G. Gilli, M.L. Tobe, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, (1989) 1265-1271.
- [26] T.P. Hanusa, *Cyanide Complexes of the Transition Metals in: R.B. King, R.H. Crabtree, C.M. Lukehart, D.A. Atwood, R.A. Scott (Eds.) Encyclopedia of Inorganic Chemistry, John Wiley & Sons, Ltd, (2005) 1-11.*
- [27] M.G. Haghghi, M. Rashidi, S.M. Nabavizadeh, S. Jamali, R.J. Puddephatt, *Dalton Trans.*, 39 (2010) 11396-11402.

علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

مراجع

- [1] A.K.-W. Chan, M. Ng, Y.-C. Wong, M.-Y. Chan, W.-T. Wong, V.W.-W. Yam, *J. Am. Chem. Soc.*, 139 (2017) 10750-10761.
- [2] C. Dragonetti, F. Fagnani, D. Marinotto, A. di Biase, D. Roberto, M. Cocchi, S. Fantacci, A. Colombo, *J. Mater. Chem. C*, 8 (2020) 7873-7881.
- [3] J. Sanning, L. Stegemann, P.R. Ewen, C. Schwermann, C.G. Daniliuc, D. Zhang, N. Lin, L. Duan, D. Wegner, N.L. Doltsinis, C.A. Strassert, *J. Mater. Chem. C*, 4 (2016) 2560-2565.
- [4] E. Rossi, A. Colombo, C. Dragonetti, D. Roberto, F. Demartin, M. Cocchi, P. Brulatti, V. Fattori, J.A.G. Williams, *Chem. Commun.*, 48 (2012) 3182-3184.
- [5] J. Kang, R. Zaen, K.-M. Park, K.H. Lee, J.Y. Lee, Y. Kang, *Cryst. Growth Des.*, 20 (2020) 6129-6138.
- [6] M.Z. Shafikov, R. Daniels, P. Pander, F.B. Dias, J.A.G. Williams, V.N. Kozhevnikov, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11 (2019) 8182-8193.
- [7] S.A. Katkova, D.O. Kozina, K.S. Kisel, M.A. Sandzhieva, D.A. Tarvanen, S.V. Makarov, V.V. Porsev, S.P. Tunik, M.A. Kinzhalov, *Dalton Trans.*, 52 (2023) 4595-4605.
- [8] C. O'Brien, M.Y. Wong, D.B. Cordes, A.M.Z. Slawin, E. Zysman-Colman, *Organometallics*, 34 (2015) 13-22.
- [9] J. Schneider, P. Du, P. Jarosz, T. Lazarides, X. Wang, W.W. Brennessel, R. Eisenberg, *Inorg. Chem.*, 48 (2009) 4306-4316.
- [10] S.W. Thomas, K. Venkatesan, P. Müller, T.M. Swager, *J. Am. Chem. Soc.*, 128 (2006) 16641-16648.
- [11] C.-Y. Lien, Y.-F. Hsu, Y.-H. Liu, S.-M. Peng, T. Shinmyozu, J.-S. Yang, *Inorg. Chem.*, 59 (2020) 11584-11594.
- [12] M.J. Bryant, J.M. Skelton, L.E. Hatcher, C. Stubbs, E. Madrid, A.R. Pallipurath, L.H. Thomas, C.H. Woodall, J. Christensen, S. Fuertes, T.P. Robinson, C.M. Beavers, S.J. Teat, M.R. Warren, F. Pradaux-Caggiano, A. Walsh, F. Marken, D.R. Carbery, S.C. Parker, N.B. McKeown, R. Malpass-Evans, M. Carta, P.R. Raithby, *Nat. Commun.*, 8 (2017) 1800.
- [13] A. Colombo, F. Fiorini, D. Septiadí, C. Dragonetti, F. Nisic, A. Valore, D. Roberto, M. Mauro, L. De Cola, *Dalton Trans.*, 44 (2015) 8478-8487.
- [14] J. Forniés, V. Sicilia, P. Borja, J.M. Casas, A. Díez, E. Lalinde, C. Larraz, A. Martín, M.T. Moreno, *Chem. Asian J.*, 7 (2012) 2813-2823.
- [15] J.R. Berenguer, J. Fernández, E. Lalinde, S. Sánchez, *Organometallics*, 32 (2013) 835-845.
- [16] J.R. Berenguer, E. Lalinde, J. Torroba, *Inorg. Chem.*, 46 (2007) 9919-9930.