

تهیه و بررسی ساختار بلوری فسفینیک آمید جدید تک آنانتیومر [(C₆H₅)₂P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH₃)(C₆H₄-4-CH₃)] آنالیز سطح هیرشفلد

ملیحه خرمکی^۱، مهرداد پورایوبی^{۱*}، مورگان پوپان^۲

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- انجمن فیزیک فرهنگستان علوم چک، اسلوانس ۲، ۱۸۲۲۱ پراگ ۸، جمهوری چک

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۵/۱۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۷/۱۴)

چکیده: در این پژوهش، ترکیب کایرال جدید *N*-(۱-پاراتولیل(اتیل))-*D*-*P* دی فنیل فسفینیک آمید، [(C₆H₅)₂P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH₃)(C₆H₄-4-CH₃)] تهیه و الگوی پراش پرتوی *X* تک‌بلور آن بررسی شد. این ترکیب در سامانه بلوری راستگوشی با گروه فضایی کایرال *P*₂₁₂₁₂₁، ۴ واحد فرمولی در یاخته یک (Z = ۴) و ثابت‌های شبکه که بیشترین تفاوت را در زوایای پیچشی N-C-C مربوط به آمین کایرال نشان می‌دهند. در ساختار بلوری، یک آرایش سه‌بعدی از اتصال مولکول‌ها با پیوندهای هیدروژنی C-H...O، P = N-H...O و C-H...π ایجاد می‌شود. سطح هیرشفلد و نمودار دوبعدی اثر انگشتی برای بررسی برهمکنش‌های موجود در ساختار و طیف‌های جذبی فرابنفش و دورنگ نمایی چرخشی بررسی شدند.

واژه‌های کلیدی: فسفینیک آمید؛ ساختار بلوری؛ تک آنانتیومر؛ آنالیز هیرشفلد؛ نمودار اثر انگشتی.

مقدمه

آنانتیومری [۹] ضروری باشد.

بررسی‌های انجام شده پیرامون فسفینیک آمیدها با فرمول (R)₂P(O)(NHR¹)، که NHR¹ یک قطعه کایرال است نشان می‌دهد که القای نامتقارن این گروه در اتم فسفر منجر به واکنش‌های متفاوت در دو گروه دیاستروئیدی R می‌شود [۸]. تفاوت‌های دیاستروئیدی قطعه‌های از نظر فرمولی یکسان، برای مثال دو گروه C₆H₅O در آمیدو فسفودی استر کایرال و یا دو گروه C₆H₅ در فسفینیک آمید کایرال، از نظر ثابت‌های جابجایی شیمیایی و جفت شدن فسفر با هسته‌های پروتون و کربن بررسی شده است [۱۰].

فسفینیک آمیدها قطعه‌های ساختاری شناخته شده در برخی از فراورده‌ها و داروهای زیست فعال [۱۱، ۱۲] هستند.

ترکیب‌های دست سان(کایرال) به دلیل کاربردهای گسترده در حوزه‌های مختلف علوم مربوط به شیمی، برتری آن‌ها در سامانه‌های زیستی، ویژگی‌های ساختاری و مکان‌شناسی (توپولوژی) جذاب اهمیت بسیاری دارند [۱]. بسیاری از پژوهشگران برای طراحی و کشف ترکیب‌های کایرال متنوع با گروه‌های عاملی مختلف، و تغییرهای ساختاری برای دستیابی به ویژگی‌های مطلوبی چون ویژگی‌های نوری غیرخطی [۲]، دستگاه‌های گسیل نور قطبی شده چرخشی [۳]، کاتالیزورهای انتخابگر ایزومر آینه‌ای (آنانتیومر) [۴، ۵] یا پزشکی [۶] تلاش کرده‌اند. دست سانی همچنین ممکن است برای برخی کاربردهای ویژه چون ساخت داروها [۷]، برنامه‌ریزی برخی واکنش‌های مختلف گروه‌های دیاستروئیدی [۸] و جداسازی

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۴۰۰۲، پست الکترونیکی: pourayoubi@um.ac.ir



بالا بودند. ساختار ترکیب بلوری با پراش‌سنج پرتو X و برنامه SHELXT بررسی شد [۱۶، ۱۷]. به این منظور، از پرتو $K\alpha$ مس در دمای ۱۲۰ کلوین استفاده شد. در تهیه این ترکیب مانند ترکیب‌های هم خانواده، [۱۸] از واکنش دی فنیل فسفینیک کلرید و α -۴-متیل بنزیل آمین و تری اتیل آمین به عنوان جاذب اسید کلریدریک در حلال کلروفرم استفاده شد. تک‌بلور مناسب آن با حلال کلروفرم و n -هپتان (با نسبت حجمی ۴ به ۱) به دست آمد (شکل ۱).

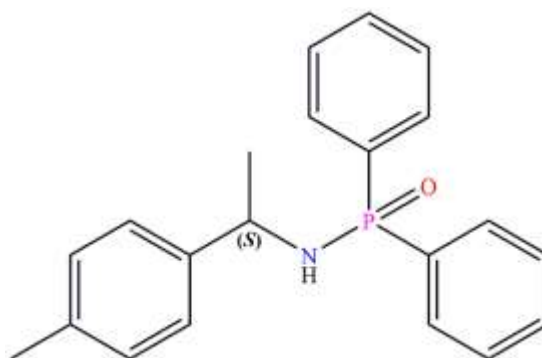
ترکیب سنتز شده خالص آنانتیومری بوده و درجه خلوص آمین استفاده شده ۹۸ درصد است. در مرکز کایرال، گروه‌ها به ترتیب از راست به چپ NH-P(O)Ph_2 ، $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH}_3$ ، CH_3 و H و مطابق پیکربندی مطلق S هستند (شکل ۲).

این ترکیب‌ها کاربردهای گسترده‌ای در تهیه دسته‌های مختلف از داروها [۱۱]، بازدارنده‌های آتش در افزودنی‌های پلیمری [۱۳] و لیگاندهای دهنده اکسیژن در شیمی کئوردیناسیون [۱۴] از خود نشان داده‌اند.

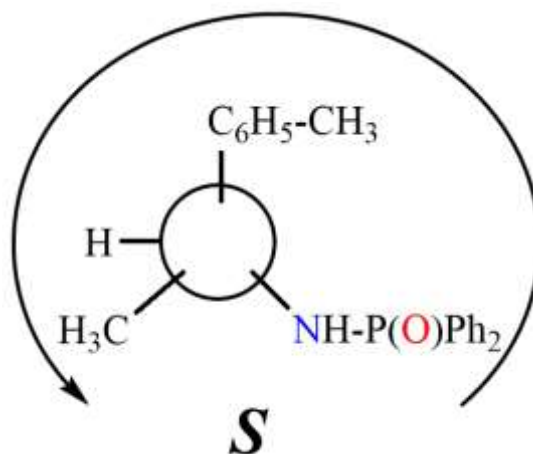
در این ترکیب‌ها، پیوند هیدروژنی $\text{N-H}\cdots\text{O=P}$ به دلیل قطبی بودن گروه P=O یک برهمکنش مهم است. از این رو، بررسی سطح هیرشفلد، ابزاری ارزشمند در تحلیل این برهمکنش‌های بین مولکولی شناخته می‌شود [۱۵]. در این پژوهش، یک تحلیل ساختاری با پراش پرتو X ، بررسی سطوح هیرشفلد و نمودارهای اثر انگشتی برای ترکیب کایرال جدید N -(۱-پاراتولیل(اتیل))- P,P -دی فنیل فسفینیک آمید انجام شده است.

بخش تجربی

همه مواد مورد استفاده در این پژوهش دارای خلوص تجزیه‌ای



شکل ۱ ساختار شیمیایی $[(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{P}(\text{O})[\text{NH}-(S)-(-)\text{CH}(\text{CH}_3)(\text{C}_6\text{H}_4-4-\text{CH}_3)]$.



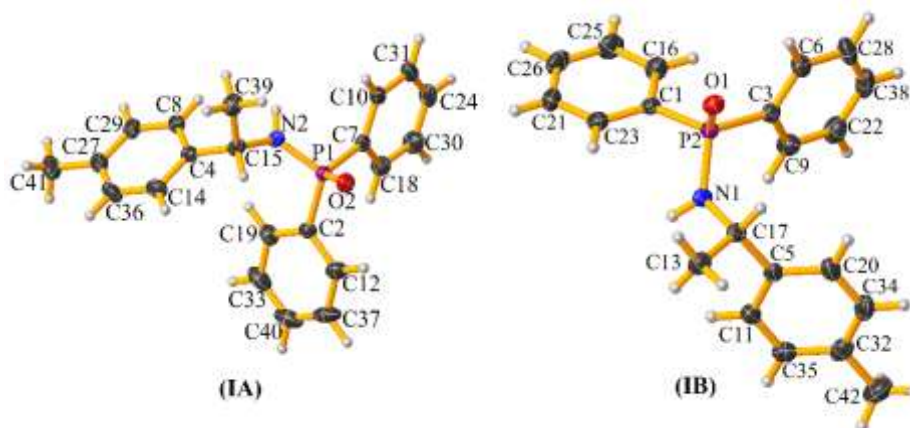
شکل ۲ پیکربندی مطلق ترکیب.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی اطلاعات بلورنگاری *N*-(۱-پارا تولیل)اتیل-*P,P*-دی فنیل فسفینیک آمید

ترکیب سنتز شده دارای سامانه بلوری راستگوشی با گروه فضایی کایرال $P2_12_12_1$ بوده و واحد بی‌تقارن آن شامل دو مولکول کامل است. فرمول ساختاری این ترکیب در شکل ۱ و

ساختار این ترکیب (به صورت بیضوی‌های دمایی) در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصه‌های بلورشناسی، برخی از طول پیوندها و زوایای پیوندی انتخابی و پیوندهای هیدروژنی در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده شده است. در این ساختار، مولکول‌های دارای اتم‌های فسفر P1 و P2 به صورت IA و IB نامگذاری شده‌اند.



شکل ۳ شمایی از دو مولکول مستقل در ساختار $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$ به صورت بیضوی‌های دمایی (بیضوی ها با احتمال ۵۰٪ رسم شده‌اند).

جدول ۱ مشخصه های بلورشناسی $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$

$C_{42}H_{44}N_2O_2P_2$	فرمول
۶۷۰٫۸	جرم فرمولی (گرم بر مول)
$0.20 \times 0.17 \times 0.11$	اندازه بلور (میلی متر مکعب)
راستگوشی	سامانه بلوری
$P2_12_12_1$	گروه فضایی
۲۳٫۴۰۰ (۵)	a (Å)
۱۳٫۸۷۰ (۳)	b (Å)
۱۱٫۳۰۱ (۲)	c (Å)
۹۰	α, β, γ (°)
۳۶۶۷٫۷ (۱۳)	حجم یاخته یک (Å ³)
۴	تعداد مولکول در یاخته
۱٫۲۱۵	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱۲۰	دما (کلوین)
$-13 \leq l \leq +13, -16 \leq k \leq +16, -28 \leq h \leq +27$	مقادیر h, k, l
0.0757 و 0.0263	R_1 و wR_2 [$I > 3\sigma(I)$]
0.0766 و 0.0281	R_1 و wR_2 (همه داده ها)
۰٫۰۴۴	R_{int}
۴۴۰	همه داده‌ها
۶۶۳۲	تعداد بازتاب‌های کل
۳٫۷ تا ۶۷٫۹	گستره θ (°) جمع‌آوری شده
۱٫۳۷	μ (mm ⁻¹)
0.13 و -0.19	$\Delta\rho_{max}$ و $\Delta\rho_{min}$ (e Å ⁻³)
۱۴۲۴	$F(000)$

جدول ۲ برخی از طول پیوندها (Å) و زوایای پیوندی (°) در شبکه بلوری $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$

طول پیوند			
P1-O2	۱٫۴۸۶۷(۱۳)	P2-O1	۱٫۴۸۹۹(۱۲)
P1-N2	۱٫۶۲۹۲(۱۵)	P2-N1	۱٫۶۳۰۵(۱۵)
P1-C2	۱٫۸۰۴۱(۱۷)	P2-C1	۱٫۸۰۳۶(۱۷)
P1-C7	۱٫۸۰۶۱(۱۷)	P2-C3	۱٫۸۰۰۴(۱۷)
N2-C15	۱٫۴۶۸(۲)	N1-C17	۱٫۴۷۷(۲)
زاویه پیوند			
O2-P1-N2	۱۱۶٫۳۵(۷)	O1-P2-N1	۱۱۵٫۳۸(۷)
O2-P1-C2	۱۰۹٫۲۱(۷)	O1-P2-C1	۱۱۳٫۳۱(۷)
O2-P1-C7	۱۱۳٫۵۴(۷)	O1-P2-C3	۱۰۸٫۵۶(۷)
N2-P1-C2	۱۰۷٫۶۹(۷)	N1-P2-C1	۱۰۳٫۶۰(۷)
N2-P1-C7	۱۰۳٫۱۰(۷)	N1-P2-C3	۱۰۸٫۲۱(۷)
C2-P1-C7	۱۰۶٫۳۰(۸)	C1-P2-C3	۱۰۷٫۳۸(۷)
P1-N2-C15	۱۲۱٫۸۲(۱۱)	P2-N1-C17	۱۲۰٫۰۹(۱۱)
P1-N2-H1n2	۱۲۱٫۴(۱۳)	P2-N1-H1n1	۱۲۳٫۷(۱۳)
C15-N2-H1n2	۱۱۵٫۲(۱۳)	C17-N1-H1n1	۱۱۴٫۴(۱۳)

جدول ۳ مشخصه‌های پیوند هیدروژنی $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$ برحسب (° و Å)

$D-H \cdots A$	$D-H$	$H \cdots A$	$D \cdots A$	$D-H \cdots A$
$C8-H1c8 \cdots O1^i$	۰٫۹۶	۲٫۴۶	۳٫۳۷۷(۲)	۱۵۹٫۷۰
$N2-H1n2 \cdots O1^i$	۰٫۹۰(۲)	۱٫۹۴(۲)	۲٫۸۳۳۳(۱۹)	۱۷۴٫۳(۱۹)
$N1-H1n1 \cdots O2^{ii}$	۰٫۹۳(۲)	۱٫۹۴(۲)	۲٫۸۶۶۹(۱۹)	۱۷۲٫۶(۱۹)

کدهای تقارنی: (i) $-x+3/2, -y, z+1/2$; (ii) $x-1/2, -y+1/2, -z+1$

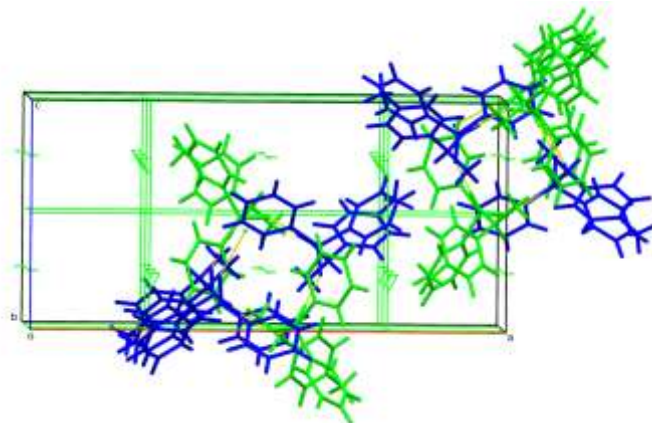
شمایی از روی هم افتادن دو مولکول در شکل ۵ آورده شده و مقدار محاسبه شده ریشه میانگین مربعی (RMS) برابر با 0.007 Å است. بیشترین تفاوت دو مولکول در زاویه پیچشی N-C-C-C مربوط به آمین کایرال است (زاویه پیچشی N2-C15-C4-C14 در مولکول IA و زاویه پیچشی N1-C17-C5-C11 در مولکول IB به ترتیب 140.2° و 140.8° هستند). هر دو مولکول در قطعه O-P-N-H پیکربندی تاقدیس‌وار (anticlinal) را نشان می‌دهند (با زوایای پیچشی 117.1° و 120.7°). چنان که دیده می‌شود، این پیکربندی، مستعد آرایش زنجیری است و مولکول‌های مستقل از نظر تقارنی به صورت یک درمیان با پیوندهای هیدروژنی $N-H \cdots O=P$ ، در راستای محور a قرار دارند (شکل ۶ الف). انبوهه سه‌بعدی شامل برهمکنش‌های $N-H \cdots O=P$ ، $C-H \cdots O=P$ و $C-H \cdots \pi$ بوده که مشارکت $N-H \cdots O=P/C-H \cdots O=P$ و $C-H \cdots \pi$ به ترتیب در شکل-های ۶، ب و ۷ آورده شده است.

تجزیه سطح هیرشفلد و نمودار دوبعدی اثر انگشتی

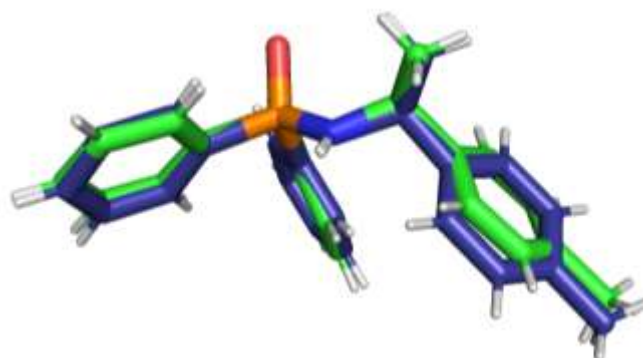
اتم فسفر در این ترکیب دارای پیکربندی چاروجهی انحراف-یافته است و بیشینه و کمینه زاویه‌های پیرامون اتم فسفر برابر با $116.35(7)^\circ$ (O2-P1-N2) و $103.10(7)^\circ$ (N2-P1-C7) برای مولکول IA و $115.38(7)^\circ$ (O1-P2-N1) و $103.60(7)^\circ$ (N1-P2-C1) برای مولکول IB هستند. طول پیوند فسفر-اکسیژن برای مولکول IA برابر با $1.4867(13) \text{ Å}$ و برای مولکول IB برابر با $1.4899(12) \text{ Å}$ بلندتر از طول پیوند دوگانه عادی $P=O$ (1.45 Å) است. همچنین طول پیوند فسفر-نیتروژن به ترتیب $1.6292(15) \text{ Å}$ و $1.6305(15) \text{ Å}$ در مولکول‌های IA و IB بوده که کوتاه‌تر از پیوند ساده فسفر-نیتروژن (1.77 Å) است [۱۹]. در هر دو مولکول، اتم‌های نیتروژن یک محیط تقریباً مسطح را با ۲ درجه انحراف از حالت آرمانی 360° نشان می‌دهند. از این رو، اتم‌های نیتروژن پذیرنده مناسبی برای شرکت در پیوند هیدروژنی نیستند. شکل ۴ پکیدگی دو مولکول مستقل از نظر تقارنی را پیرامون محور پیچی 2_1 در یاخته یک‌ه نشان می‌دهد.

نرم افزار CrystalExplorer نسخه ۱۷/۵ استفاده شد [۲۰]. در نقشه‌های سطح هیرشفلد، لکه‌های قرمز مربوط به تماس‌هایی با فاصله‌های نزدیک‌تر از مجموع شعاع‌های واندروالس (vdW) و نواحی سفید و آبی به ترتیب نشان‌دهنده تماس‌های پیرامون جدایی vdW و تماس‌های طولانی‌تر هستند [۲۱].

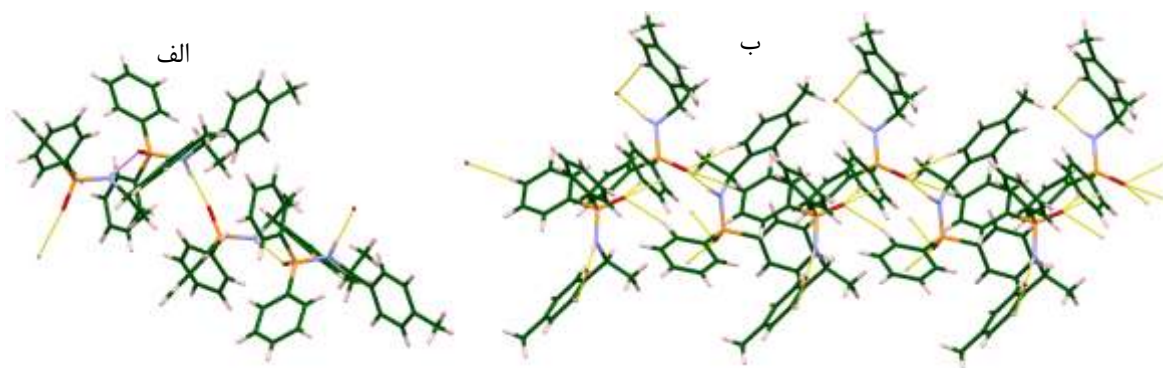
تجزیه و تحلیل سطح هیرشفلد، شامل سطوح سه‌بعدی و نمودارهای اثر انگشت دوبعدی، توصیف مفصلی از برهمکنش‌ها را در ساختارهای بلوری ارائه می‌دهد [۱۵]. برای بررسی برهمکنش‌های بین‌مولکولی در ترکیب کایرال $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$ از



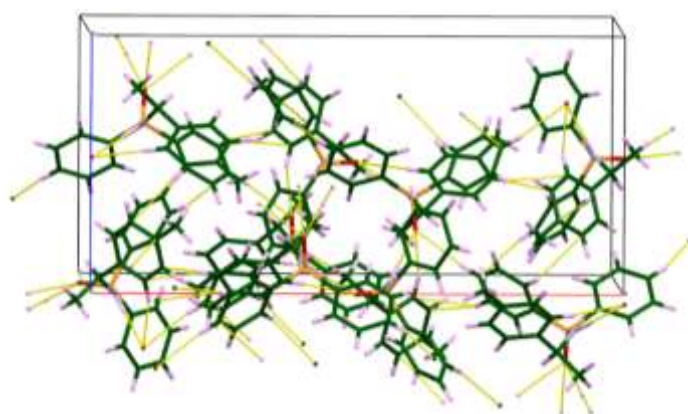
شکل ۴ شمایی از پکیدگی دو مولکول مستقل از نظر تقارنی پیرامون محور پیچی 2_1 . مولکول‌های مستقل تقارنی IA و IB به ترتیب به رنگ‌های آبی و سبز نشان داده شده‌اند.



شکل ۵ شمایی از بهترین روی هم افتادن دو مولکول مستقل از نظر تقارنی IA و IB. اتم‌های کربن در IA و IB به ترتیب به رنگ‌های آبی و سبز نشان داده شده‌اند.



شکل ۶ شمایی از الگوی پیوند هیدروژنی $(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$. (الف) الگوی یک‌بعدی که با پیوند هیدروژنی $N-H \cdots O=P$ ایجاد شده است. (ب) بخشی از الگوی سه‌بعدی تشکیل شده با پیوندهای هیدروژنی $N-H \cdots O=P$ و $C-H \cdots O=P$.

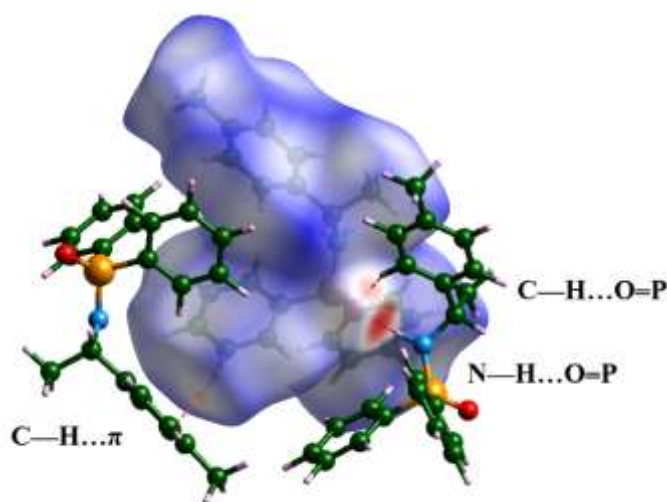


شکل ۷ شمایی از الگوی پیوند هیدروژنی ساختار $[(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$. الگوی سه‌بعدی از پیوندهای هیدروژنی $N-H\cdots O=P$ و $C-H\cdots O=P$ و برهمکنش‌های $C-H\cdots\pi$ دیده می‌شود.

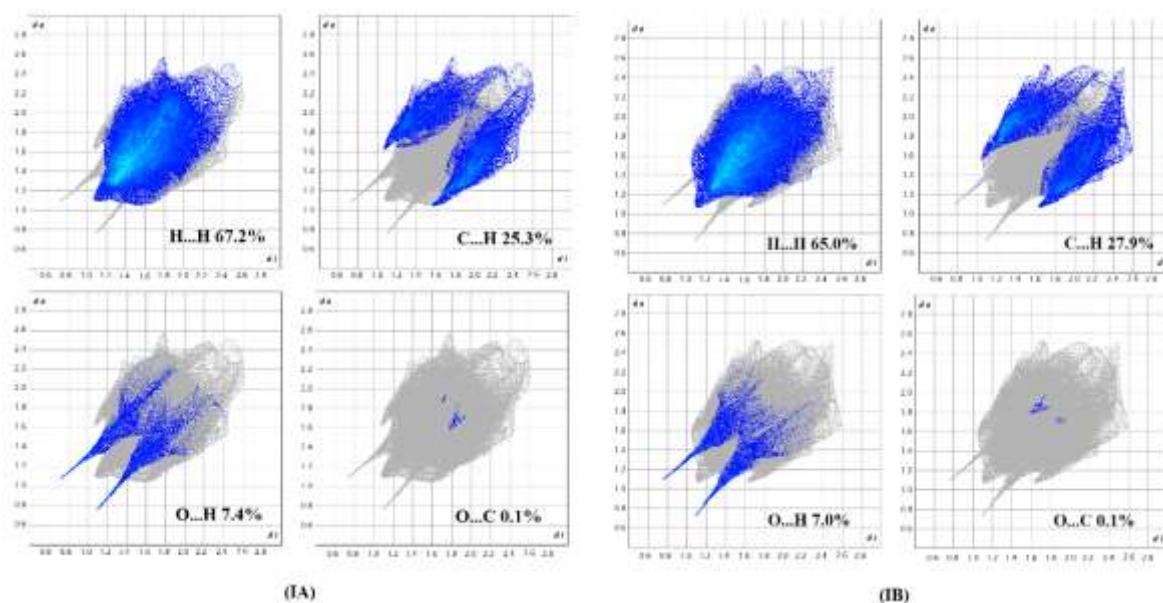
طیف‌های جذبی فرابنفش (UV) و دورنگ نمایی چرخشی (CD) طیف‌های جذبی فرابنفش (UV) و دورنگ نمایی چرخشی (CD) به ترتیب از محلول‌های با غلظت 0.0284 میلی مولار در حلال دی‌کلرومتان و غلظت 0.375 میلی مولار در حلال کلروفرم تهیه گردید (شکل ۱۰). در طیف UV قله‌های جذبی دیده شده در 230 و 264 نانومتر به ترتیب به انتقال‌های $\pi \rightarrow \pi^*$ و $n \rightarrow \pi^*$ حلقه آمین و حلقه‌های فنیل نسبت داده می‌شوند.

در طیف CD. حضور جذب‌های در 246 و 265 نانومتر مربوط به انتقال‌های $\pi \rightarrow \pi^*$ و $n \rightarrow \pi^*$ نشان دهنده انتقال دست سانی به کل مولکول هستند.

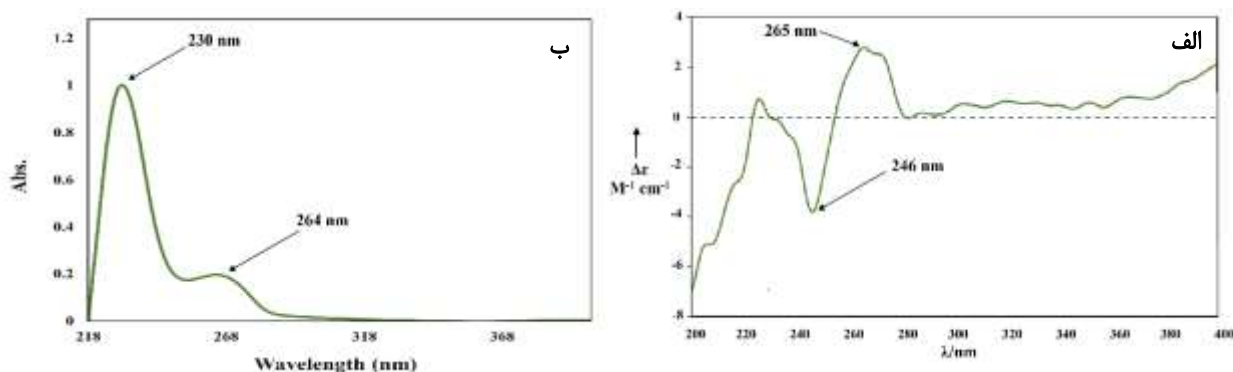
در سطح هیرشفلد این ترکیب (شکل ۸)، پیوند هیدروژنی $N-H\cdots O=P$ به صورت ناحیه قرمز رنگ بزرگ و برهمکنش‌های $C-H\cdots O=P$ به صورت ناحیه قرمز رنگ کوچک و $C-H\cdots\pi$ به صورت لکه‌های قرمز کم‌رنگ ظاهر شده‌اند. نمودارهای اثر انگشتی نماهایی گرافیکی را بر حسب d_i و d_e ارائه می‌دهند. براساس این نمودارها (شکل ۹)، در این ساختار برهمکنش‌های $H\cdots H$ بیشترین درصد از کل برهمکنش‌های بین‌مولکولی را شامل می‌شود (67.2% برای IA و 65.0% برای IB). درصد توزیع سایر برهمکنش‌های این ساختار به ترتیب $C\cdots H$ (25.3%)، $O\cdots H$ (7.4%) و $O\cdots C$ (0.1%) در مولکول IA و $C\cdots H$ (27.9%)، $O\cdots H$ (7.0%) و $O\cdots C$ (0.1%) در مولکول IB است.



شکل ۸ نمایش سطح هیرشفلد ترکیب کایرال $[(C_6H_5)_2P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH_3)(C_6H_4-4-CH_3)]$. پیوندهای هیدروژنی $C-H\cdots O=P$ ، $N-H\cdots O=P$ و $C-H\cdots\pi$ در شکل آورده شده‌اند. مولکول IB درون سطح هیرشفلد قرار داده شده است.



شکل ۹ نمودارهای دویعدی اثر انگشتی (سمت راست برای IB و سمت چپ برای IA).



شکل ۱۰ (الف طیف CD، ب) طیف جذبی (UV).

برداشت

در این پژوهش، ترکیب کایرال جدید N -(۱-پاراتولیل)اتیل- P,P -دی فنیل فسفینیک آمید تهیه گردید. بررسی‌های بلورشناسی وجود پیوندهای هیدروژنی $C-H\cdots O$ ، $N-H\cdots O$ و $C-H\cdots \pi$ را در این ترکیب نشان می‌دهد. این برهمکنش‌ها آرایه‌ای سه‌بعدی را ایجاد می‌نمایند. نمایه گرافیکی این برهمکنش‌ها با تجزیه سطح هرشفیلد ارائه شد. نمودارهای اثر انگشتی درصد توزیع برهمکنش‌ها را به ترتیب بیشترین مشارکت به صورت: $O\cdots H < C\cdots H < H\cdots H$ نشان می‌دهد. در طیف‌های جذبی فرابنفش و دورنگ نمایی چرخشی، انتقال-های $n \rightarrow \pi^*$ و $\pi \rightarrow \pi^*$ دیده شدند.

قردانی

نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت‌های پژوهشی از طرح ۳/۵۳۹۳۸ سپاسگزارند.

مراجع

- [1] Prins L.J., Reinhoudt D.N., Timmerman, P., "Noncovalent Synthesis Using Hydrogen Bonding", *Angewandte Chemie International Edition* 40 (2001) 2382–2426.
- [2] Gu B., Zhao C., Baev A., Yong K-T., Wen S., Rasad P.N., "Molecular Nonlinear Optics : Recent Advances and Applications", *Advances in Optics and Photonics* 8 (2016) 328–369.
- [3] Zinna F., Giovannella U., Di Bari L., "Highly Circularly Polarized Electroluminescence from a Chiral Europium Complex", *Advanced Materials*

- Y., Wong P., Braun M.R., Flint M., McMullan L.K., Chen S., Fearn R., Swaminathan S., Mayers D.L., Spiropoulou C.F., Lee W.A., Nichol S.T., Cihlar T., Bavari S., "Therapeutic Efficacy of the Small Molecule GS-5734 Against Ebola Virus in Rhesus Monkeys", *Nature* 531 (2016) 381–385.
- [12] Palacios F., "Synthesis of β -Aminophosphonates and -Phosphinates", *Chemical Reviews* 105 (2005) 899–931.
- [13] Nguyen C., Kim J., "Thermal Stabilities and Flame Retardancies of Nitrogen – Phosphorus Flame Retardants Based on Bisphosphoramidates", *Polymer Degradation and Stability* 93 (2008) 1037–1043.
- [14] Aladzheva I.M., Bykhovskaya O.V., Nelyubina Y.V., Klemenkova Z.S., Petrovskii P.V., Odinets I.L., "Uranium Complexes of Cyclic O,O-bidentate Ligands With the P-N-P Backbone", *Inorganica Chimica Acta* 373 (2011) 130–136.
- [15] Spackman M.A., Jayatilaka D., "Hirshfeld Surface Analysis", *CrystEngComm* 11 (2009) 19–32.
- [16] Sheldrick G.M., "Crystal Structure Refinement With SHELXL", *Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry* 71 (2015) 3–8.
- [17] Sheldrick G.M., "SHELXT–Integrated Space-Group and Crystal-Structure Determination", *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances* 71 (2015) 3–8.
- [18] Hamzehee F., Pourayoubi M., Farhadipour A., Choquesillo-Lazarte D., "Two New Phosphinic Amides: Synthesis, Crystal Structure, and Theoretical Study of Hydrogen Bonding", *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements* 192 (2017) 359–367.
- [19] Corbridge D.E.C., *Phosphorus-An outline of its chemistry, biochemistry, and technology*, Boca Raton 2013.
- [20] Spackman P.R., Turner M.J., McKinnon J.J., Wolff S.K., Grimwood D.J., Jayatilaka D., Spackman M.A., "CrystalExplorer: a Program for Hirshfeld Surface Analysis, Visualization and Quantitative Analysis of Molecular Crystals", *Journal of Applied Crystallography* 54 (2021) 1006–1011.
- [21] McKinnon J.J., Jayatilaka D., Spackman M.A., "Towards Quantitative Analysis of Intermolecular Interactions With Hirshfeld Surfaces", *Chemical Communications* 37 (2007) 3814–3816.
- Letters 27 (2015) 1791–1795.
- [4] Headley C.E., Marsden S.P., "Synthesis and Application of P-Stereogenic Phosphines as Superior Reagents in the Asymmetric Aza-Wittig Reaction", *Journal of Organic Chemistry* 72 (2007) 7185–7189.
- [5] Hua D.H., Chan-yu-king R., Mckie J.A., "Chiral Allylphosphonyl Anions (Ambident Nucleophiles) with Cyclic Enones (Ambident Electrophiles)", *Journal of the American Chemical Society* 109 (1987) 5026–5029.
- [6] De Luca L., Chiminazzo A., Sperti L., Strukul G., Scarso A., "Stereoselective Synthesis of Chiral Isatin Containing Bisphosphonates as Potential Anti-Resorption Bone Drugs", *ChemistrySelect* 2 (2017) 3262–3267.
- [7] Bredikhin A.A., Gubaidullin A.T., Bredikhina Z.A., Krivolapov D.B., Pashagin A.V., Litvinov I.A., "Absolute Configuration and Crystal Packing for Three Chiral Drugs Prone to Spontaneous Resolution: Guaifenesin, Methocarbamol and Mephensin", *Journal of Molecular Structure* 920 (2009) 377–382.
- [8] Nakayama K., Thompson W.J., "A Highly Enantioselective Synthesis of Phosphate Triesters", *Journal of the American Chemical Society* 112 (1990) 6936–6942.
- [9] Karimi Ahmadabad F., Pourayoubi M., Bakhshi H., "Decorated Single-Enantiomer Phosphoramidate-Based Silica/magnetic Nanocomposites for Direct Enantioseparation", *RSC Advances* 9 (2019) 27147–27156.
- [10] Eslami F., Pourayoubi M., Sabbaghi F., Skořepová E., Dušek M., Baniyaghoob S., "Diastereotopic Groups in Two New Single-Enantiomer Structures (R)₂P(O)[NH-(+)CH(C₂H₅)(C₆H₅)] (R = OC₆H₅ and C₆H₅)", *Acta Crystallographica Section E, Crystallographic Communications* 79 (2023) 769–776.
- [11] Warren T.K., Jordan R., Lo M.K., Ray A.S., Mackman R.L., Soloveva V., Siegel D., Perron M., Bannister R., Hui H.C., Larson N., Strickley R., Wells J., Stuthman K.S., Van Tongeren S.A., Garza N.L., Donnelly G., Shurtleff A.C., Retterer C.J., Gharaibeh D., Grimes E., Welch L.S., Gomba L., Wilhelmsen C.L., Zamani R., Kenny T., Brett P., Nichols D.K., Nuss J.E., Nagle E.R., Kugelman J.R., Palacios G., Doerffler E., Neville S., Carra E., Clarke M.O., Zhang L., Lew W., Ross B., Wang Q., Chun K., Wolfe L., Babusis D., Park Y., Stray K.M., Trancheva I., Feng J.Y., Barauskas O., Xu