مقاله پژوهشی

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

**مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران** سال سی و سوم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۴، از صفحهٔ ۱۶۱ تا ۱۶۸

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

ملیحه خرمکی<sup>۱</sup>، مهرداد پورایوبی<sup>\*۱</sup>، مورگان پوپان<sup>۲</sup>

۲- 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  $N - (1 - y)(\operatorname{retull}(\operatorname{Trull})) - P - e - e$ ی فنیل فسفینیک آمید، **چکیده**: در این پژوهش، ترکیب کایرال (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)2P(O)[NH-(*S*)-(-)CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)] Mulaib بلوری راستگوشی با گروه فضایی کایرال  $P(2_12_12_1)$  و احد فرمولی در یاخته یکه (f = Z) و ثابتهای شبکه Mulaib بلوری راستگوشی با گروه فضایی کایرال  $P(1_12_12_1)$  و احد فرمولی در یاخته یکه (f = Z) و ثابتهای شبکه A (A) (

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

## مقدمه

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 ترکیب های 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 (انانتیومر) [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 دیاستروتوپی [۸] و جداسازی

انانتییومری [۹] ضروری باشد.

بررسیهای انجام شده پیرامون فسفینیک آمیدها با فرمول بررسیهای انجام شده پیرامون فسفینیک آمیدها با فرمول NHR<sup>1</sup> یک قطعه کایرال است نشان می دهد که القای نامتقارن این گروه در اتم فسفر منجر به واکنشهای متفاوت در دو گروه دیاستروتوپی R می شود [۸]. تفاوتهای دیاستروتوپی قطعههای از نظر فرمولی یکسان، برای مثال دو گروه  $C_{6}H_{5}O$  در آمیدوفسفودی استر کایرال و یا دو گروه  $C_{6}H_{5}O$  در آمیدوفسفودی استر کایرال و یا دو گروه  $C_{6}H_{5}O$  در آمیدوفسفودی استر کایرال و یا دو جروه  $C_{6}H_{5}O$  در آمیدوفسفودی استر کایران و یا دو گروه روه حفت شدن فسفر با هستههای پروتون و 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.

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۵۱۳۸۸۰۴۰۰۲، پست الکترونیکی: pourayoubi@um.ac.ir

Copyright © 2025 The author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/</u>) Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited

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 P=O-H···O 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-(1-پاراتولیل(اتیل))-P-P-دی فنیل فسفینیک آمید انجامشده است.

بالا بودند. ساختار ترکیب بلوری با پراش سنج پرتو X و برنامه  $K\alpha$  بالا بودند. ساختار ترکیب بلوری با پراش سنج پرتو  $K\alpha$  در تهیه این منظور، از پرتو می مس در دمای ۱۲۰ کلوین استفاده شد. در تهیه این ترکیب مانند ترکیبهای هم خانواده، [۱۸] از واکنش دی فنیل فسفینیک کلرید و 4-m(-)-(S)-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 4 به () به دست آمد (شکل ).

ترکیب سنتز شده خالص انانتیومری بوده و درجه خلوص آمین استفاده شده ۹۸ درصد است. در مرکز کایرال، گروهها به ترتیب از راست به چپ CH<sub>3</sub> ،NH-P(O)Ph<sub>2</sub> و CH<sub>3</sub> ،C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-CH<sub>3</sub> و H و مطابق پیکربندی مطلق *S* هستند (شکل ۲).

## بخش تجربى

همه مواد مورد استفاده در این پژوهش دارای خلوص تجزیهای



شكل ۱ ساختار شيميايي [(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)].



**شکل ۲** پیکربندی مطلق ترکیب.

بحث و نتیجهگیری

بررسی اطلاعات بلورنگاری N–(۱–پارا تولیل)اتیل)– $P_{\bullet}$ -دی فنیل فسفینیک آمید

ترکیب سنتز شده دارای سامانه بلوری راستگوشی با گروه فضایی کایرال P212121 بوده و واحد بی تقارن 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<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>) (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)[NH-(S)-(-)-CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)) به صورت بیضویهای دمایی (بیضوی ها احتمال ۵۰٪ رسم شدهاند.)

| <u>C42H44N2O2P2</u>   | فرمول   |
|---|---|
| ٨, ۲۰   | جرم فرمولی (گرم بر مول)   |
| •, <b>Y</b> • × •, <b>\Y</b> × •, <b>\</b>  | اندازہ بلور (میلی متر مکعب)                                       |
| راستگوشی  | سامانه بلورى  |
| $P2_{1}2_{1}2_{1}$  | گروه فضایی  |
| ۲۳٬۴۰۰(۵)   | (Å) a   |
| ١٣/٨٧٠ (٣)  | (Å) b   |
| 11/201(7)   | (Å) <i>c</i>  |
| ٩٠  | (°)γβ.α   |
| <i><b>WFFY</b></i> / <b>V(1W</b> )  | حجم ياخته يكه (Å <sup>3</sup> )                                   |
| f   | تعداد مولکول در ياخته   |
| ۱,۲۱۵   | چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)                                     |
| ١٢٠   | دما (کلوین)   |
| - ) $\texttt{m} \leq l \leq$ + ) $\texttt{m}$ ) $\texttt{P} \leq k \leq$ + ) $\texttt{P}$ $\texttt{TA} \leq h \leq$ + $\texttt{TY}$ | مقادیر <i>l ،k ،h</i> مقادیر                                      |
| ۲۶۳، و ۷۵۷، ۱۰  | $[I > 3\sigma(I)] wR_2  {}_{\mathcal{R}}R_1$                      |
| ۲۸۱ و ۷۶۶ .   | R1 و WR2 (همه داده ها)  |
| • <sub>/</sub> • ۴۴   | $R_{ m int}$  |
| <i>f¥</i> .   | همه دادهها  |
| 887Y  | تعداد بازتابھای کل  |
| ۳,۷ ۵ ۶۷,۹  | گستره $	heta^{r}$ (°) جمعآوری شده                                 |
| ١,٣٧  | (mm <sup>-1</sup> ) µ   |
| ۱۹، • - و ۳۳، •   | (e Å <sup>-3</sup> ) $\Delta \rho_{max}$ $_{e} \Delta \rho_{min}$ |
| 1878  | F(000)  |

جدول ۱ مشخصه های بلورشناسی [(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)].

| طول پيوند   |                        |             |   |
|-------------|------------------------|-------------|---|
| P1-O2       | 1,4884(13)             | P2-01       | 1,4899(17)                                  |
| P1-N2       | 1,8898(10)             | P2-N1       | 1,88.0(10)                                  |
| 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      | 1,444(2)                                    |
| زاويه پيوند |                        |             |   |
| O2-P1-N2    | ۱۱۶/۳۵(۷)              | O1-P2-N1    | ۱۱۵٬۳۸(۷)                                   |
| O2-P1-C2    | ۱۰۹/۲۱(۷)              | O1-P2-C1    | ۱۱۳/۳۱(Y)                                   |
| O2-P1-C7    | 118/04(7)              | O1-P2-C3    | $1 \cdot \Lambda_{0} \Delta \mathcal{F}(Y)$ |
| N2-P1-C2    | ۱۰۷ <sub>/</sub> ۶۹(۷) | N1-P2-C1    | ۱۰۳/۶۰(Y)                                   |
| N2-P1-C7    | ۱۰۳/۱۰(Y)              | N1-P2-C3    | ۱۰۸٬۲۱(۷)                                   |
| C2-P1-C7    | ۱۰۶/۳۰(λ)              | C1-P2-C3    | ۱۰۷٬۳۸(۷)                                   |
| P1-N2-C15   | ۱۲۱٬۸۲(۱۱)             | P2-N1-C17   | 17.,.9(11)                                  |
| P1-N2-H1n2  | 121/4(12)              | P2-N1-H1n1  | 177/7(17)                                   |
| C15-N2-H1n2 | 110(7(17)              | C17-N1-H1n1 | 114(4(17)                                   |

**جدول ۲** برخی از طول پیوندها (Å) و زوایای پیوندی (<sup>°</sup>) در شبکه بلوری [(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)[NH-(S)-(-)CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)] (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)

**جدول ۳** مشخصههای پیوند هیدروژنی [(C6H4-4-CH3)(C6H4-4-CH3)](C6H5)2P(O)[NH-(S)-(−)CH(CH3) برحسب (° و Å)

| D-H···A                     | D-H     | $H \cdots A$ | $D \cdots A$ | D-H···A   |
|-----------------------------|---------|--------------|--------------|-----------|
| $C8-H1c8\cdots O1^{i}$      | • /9۶   | ۲,۴۶         | ۳٬۳۷۷(۲)     | ۱۵۹٬۷۰    |
| $N2\text{-}H1n2\cdots O1^i$ | ·/٩·(٢) | ١/٩۴(٢)      | ۲٬۸۳۳۳(۱۹)   | ۱۷۴٫۳(۱۹) |
| N1-H1n1…O2 <sup>ii</sup>    | •/9٣(Y) | ١,٩۴(٢)      | ۲٫۸۶۶۹(۱۹)   | ۱۷۲/۶(۱۹) |

(i) –*x*+۳/۲, –*y*, *z*+۱/۲; (ii) *x*–۱/۲, –*y*+1/۲, –*z*+۱ کدهای تقارنی:

اتم فسفر در این ترکیب دارای پیکربندی چاروجهی انحراف-یافته است و بیشینه و کمینه زاویههای پیرامون اتم فسفر برابر (N2-P1-C7) برای مولکول IA و °(N/۳۸(۷) (O1-P2-N1) و (N1-P2-C1) ۱۰۳/۶۰(۷) برای مولکول IB هستند. طول پیوند فسفر-اکسیژن برای مولکول IA برابر با ۱٬۴۸۶۷(۱۳) Å و برای مولکول IB برابر با ۱٬۴۸۶۹(۱۲) ، بلندتر از طول ییوند دوگانه عادی P=O (۱٬۴۵ Å) است. همچنین طول پیوند فسفر-نیتروژن به ترتیب Å (۱۵)۱٬۶۲۹۲ و IA ابوده که کوتاهتر از IB او IB بوده که کوتاهتر از ا پیوند ساده فسفر-نیتروژن (۱٬۷۷ Å) است [۱۹]. در هر دو مولکول، اتمهای نیتروژن یک محیط تقریبا مسطح را با ۲ درجه انحراف از حالت آرمانی °۳۶۰ 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 ييرامون محور ييچي 2<sub>1</sub> در ياخته يكه نشان ميدهد.

شمایی از روی هم افتادن دو مولکول در شکل ۵ آورده شده و مقدار محاسبه شده ریشه میانگین مربعی (RMS) برابر با ۸٬۰۰۷ 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 ۱۴۰٬۲° و O-P-N-H هستند). هر دو مولکول در قطعه  $-\mathfrak{SF}/\Lambda^{\circ}$ پیکربندی تاقدیسوار (anticlinal) را نشان میدهند (با زوایای پیچشی ۱۱۷٬۱° و ۱۲۰٬۷°). چنان که دیده میشود، این ییکربندی، مستعد آرایش زنجیری است و مولکولهای مستقل از نظر تقارنی به صورت یک درمیان با پیوندهای هیدروژنی N-H···O=P، در راستای محور a قرار دارند (شکل ۶ الف). انبوهه سهبعدی شامل برهمکنشهای N-H…O=P، و  $C-H\cdots\pi$  ،  $C-H\cdotsO=P$ - و  $N-H\cdots O=P/C-H\cdots D$ و N-H···O=P/C-H···O=P های ۶، ب و ۷ آورده شده است. تجزیه سطح هیرشفلد و نمودار دوبعدی اثر انگشتی 194

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 برهمکنشهای بینمولکولی در ترکیب کایرال (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>P(O)[NH-(S)-)-(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)]

نرمافزار 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].



**شکل ۴** شمایی از پکیدگی دو مولکول مستقل از نظر تقارنی پیرامون محور پیچی 2<sub>1</sub>. 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<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>). (الف) الگوی یکبعدی که با پیوند هیدروژنی M-H···O=P). (الف) الگوی یکبعدی که با پیوند هیدروژنی N-H···O=P و N-H···O=P.



**شکل ۷** شمایی از الگوی پیوند هیدروژنی ساختار [NH-(S)-(−)CH(CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>). الگوی سهبعدی از پیوندهای هیدروژنیN–H…O=P و N–H…O=P و N–H…O=P دیده میشود.

در سطح هیرشفلد این ترکیب (شکل ۸)، پیوند هیدروژنی N-H···O=P به صورت ناحیه قرمز رنگ بزرگ و برهمکنش-های C-H···O=P به صورت ناحیه قرمز رنگ کوچک و C-H···π 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···H بیشترین درصد از کل IA ساختار برهمکنشهای بینمولکولی را شامل میشود (۲/۹٪ برای IA و ۰/۵۹٪ برای O··۰ (۲۵٪)، ساختار به ترتیب O···C (۲۵٪)، H···H (۲۷/۹) و ۰۰۰۲ (۲۰/۱) و ۱۵۰۰ (۲۰/۱) و ۰۰۰۲

**طیفهای جذبی فرابنفش (UV) و دورنگ نمایی چرخشی (CD)** طیفهای جذبی فرابنفش (UV) و دورنگ نمایی چرخشی چرخشی (CD) به ترتیب از محلولهای با غلظت ۰٫۰۲۸۴ میلی مولار در حلال دی کلرومتان و غلظت ۰٫۳۷۵ میلی مولار در حلال کلروفرم تهیه گردید (شکل ۱۰). در طیف UV قلههای جذبی دیده شده در ۲۳۰ و ۲۶۴ نانومتر به ترتیب به انتقالهای \* $\pi \rightarrow \pi$  و  $\pi \rightarrow \pi$ 

در طیف CD، حضور جذبهای در ۲۴۶ و ۲۶۵ نانومتر مربوط به انتقالهای  $\pi operatorrightarrow \pi$  نشان دهنده انتقال دست سانی به کل مولکول هستند.



**شکل ۸** نمایش سطح هیرشفلد ترکیب کایرال [(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>)(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>). پیوندهای هیدروژنی C–H···O=P). پیوندهای هیدروژنی C–H···O=P). پیوندهای هیدروژنی NH-(S)-(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-4-CH<sub>3</sub>). پیوندهای میدروژنی NH-··O=P، مراکز محال اورده شده است.



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



شكل ۱۰ الف) طيف CD، ب) طيف جذبي (UV).

برداشت

**قدردانی** 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., Giovanella U., Di Bari L., "Highly Circularly Polarized Electroluminescence from a Chiral Europium Complex", Advanced Materials در این پژوهش، ترکیب کایرال جدید N-((۱-پاراتولیل)اتیل)-Pa-دی فنیل فسفینیک آمید تهیه گردید. بررسیهای بلورشناسی وجود پیوندهای هیدروژنی N–H···O و  $-H···\pi$  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: N···H > K···H نشان میدهد. در طیفهای جذبی فرابنفش و دورنگ نمایی چرخشی، انتقال-های  $\pi \rightarrow n \rightarrow r$  Y., Wong P., Braun M.R., Flint M., Mcmullan L.K., Chen S., Fearns 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 StructureRefinementWithSHELXL",ActaCrystallographicaSectionC:StructuralChemistry71 (2015)3-8.

[17]SheldrickG.M.,"SHELXT-IntegratedSspace-GroupandCrystal-StructureDetermination", 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., Sperni 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 Mephenesin", 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 Phosphoramide-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  $(R)_2P(O)[NH-(+)CH(C_2H_5)(C_6H_5)]$   $(R = OC_6H_5 \text{ and } C_6H_5)$ ", 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