

تهیه، بررسی ساختار بلوری و آنالیز سطح هیرشفلد یک ترکیب جدید راسمیک آمیدوفسفواستر

علی کلاته^۱، مهرداد پورایوبی^{۱*}، فاطمه کریمی احمدآباد^۱، مارک نکاس^۲

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

2- Department of Chemistry, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlarska 2, Brno, CZ-61137, Czech Republic

چکیده:

یک ترکیب راسمیک جدید ۲و۲-دی متیل، ۱و۳-پروپان دی آمین، N و N-بیس((O-فنیل) (سیکلووهگزیل آمیدو) فسفینات)، $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NHP(O)(NHC_6H_{11})(OC_6H_5)$ تهیه و با روش های پراش پرتو ایکس و طیف سنجی مطالعه شد. در ساختار بلوری، مولکول ها در یک آرایش دوبعدی موازی با صفحه (۱۰-۱) از طریق پیوندهای هیدروژنی $NH\cdots OP$ تجمع می یابند. ترکیب در سیستم بلوری مونوکلینیک با گروه فضایی $P2_1/n$ متبلور می گردد و واحد بی تقارن از یک مولکول تشکیل شده است. تجزیه و تحلیل سطح هیرشفلد و نمودارهای اثر انگشت بررسی می شود.

واژه های کلیدی: آمیدوفسفواستر، ساختار بلوری، پیوند هیدروژنی، آنالیز هیرشفلد.

مقدمه

در میان ترکیبات فسفر، فسفر آمیدها به دلیل داشتن کاربردهای متنوع و روزافزون بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. تعدادی از این ترکیبات در صنایع کشاورزی به عنوان کود استفاده می شوند که این کاربرد به دلیل داشتن عناصر فسفر و نیتروژن می باشد و نیز تعدادی از آن ها برای افزایش کارایی کودهای مبتنی بر اوره استفاده می شوند.^۱ همچنین تعدادی از آن ها به عنوان ضد آفات در کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرند.^{۲،۳} گزارش هایی از استفاده فسفر آمیدها در صنایع دارویی وجود دارد که به عنوان مثال به درمان انواع مختلف سرطان اشاره می شود.^{۴،۵} اخیرا کاربرد این ترکیبات به عنوان عامل بهبود دهنده کیفیت بسپارها مانند عامل بازدارنده آتش یا بهبود شفافیت بسپارها نیز مورد توجه قرار گرفته است.^۶

برهمکنش های متنوع مولکولی مخصوصا برهمکنش های قوی از نوع پیوندهای هیدروژنی در ترکیبات دارای اسکلت $(N)_2P(O)$ و ارتباط ساختار مولکولی و ساختار بلوری مطالعه شده است و در مقاله های مربوطه روش های سنتزی مختلفی برای تهیه ترکیبات کایرال و راسمیک ارائه شده است.^{۷-۹} در تهیه ترکیبات راسمیک با سه گروه متفاوت متصل به فسفر نیاز به انجام واکنش ها به صورت مرحله-مرحله است و فرآیند جداسازی نمک تشکیل شده (حاصل از واکنش جاذب HCl و اسید کلریدریک جدا شده در آن مرحله) و محصول اصلی چالشی است که نیاز به دانستن خواص حلالیت حلال مورد استفاده در فرآیند واکنش دارد. در این زمینه به کار پیشتر گزارش شده در تهیه ترکیبات راسمیک $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NHP(O)(NHC_6H_4-4-CH_3)$ از خانواده فسفریک تری آمیدها و $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C_6H_5$ از خانواده آمیدوفسفواسترها اشاره می شود.^{۱۰،۱۱}

در این مقاله ترکیب راسمیک جدید ۲و۲-دی متیل، ۱و۳-پروپان دی آمین، N و N-بیس((O-فنیل) (سیکلوهگزیل آمیدو) فسفینات) $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NHP(O)(NHC_6H_{11})(OC_6H_5)$ با ساختار مولکولی شکل ۱ تهیه و بررسی گردید .

بخش تجربی:

کلیه مواد استفاده شده در این کار با درجه خلوص تجزیه‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

طیف‌های 1H NMR، ^{13}C NMR و ^{31}P NMR با طیف‌سنج Bruker Avance DRS 300 ثبت شد. تغییرات شیمیایی نسبت به TMS برای 1H و ^{13}C و ^{31}P برای H_3PO_4 ۸۵٪، به عنوان استاندارد تعیین شد. طیف مادون قرمز (IR) با یک طیف‌سنج Buck 500 با استفاده از قرص KBr ثبت شد. بلورنگاری با پرتو ایکس با استفاده از دستگاه Xcalibur, Sapphire2, large Be window و تابش $Mo\ K\alpha$ ($\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$) بر روی تک بلور بی رنگ ترکیب انجام شد.

پیش ماده راسمیک (R, S)-(Cl)P(O)(OC₆H₅)(NHC₆H₁₁) طبق روشی که در کار قبلی گزارش شده بود¹⁰، تهیه شد.

برای تهیه ۲و۲-دی متیل، ۱و۳-پروپان دی آمین، N و N-بیس((O- فنیل) (سیکلوهگزیل آمیدو) فسفینات)، $(R, S)-(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NHP(O)(NHC_6H_{11})(OC_6H_5)$ به محلولی از (R, S)-(Cl)P(O)(OC₆H₅)(NHC₆H₁₁) در کلروفرم خشک، محلولی از ۲و۲-دی متیل، ۱و۳-دی پروپان آمین و تری اتیل آمین (نسبت مولی ۲:۱:۲) در همان حلال در دمای صفر درجه سانتیگراد اضافه شد. پس از چهار ساعت هم زدن، حلال به وسیله پمپ خلا حذف شد و سپس محصول با آب مقطر شسته شد و در مخلوط کلروفرم/n-هپتان در دمای اتاق متبلور شد.

M. p. 76 °C. **IR (KBr, cm⁻¹):** 3748, 3690, 3454, 3265, 3048, 3029, 2932, 2874, 1590, 1483, 1426, 1250, 1193, 1100, 939, 809, 762, 688. **$^{31}P\{^1H\}$ NMR** (121.79 MHz, DMSO-d₆, 296.5 K, H_3PO_4 external): δ = 13.04 ppm. **1H NMR** (300.84 MHz, DMSO-d₆, 295.9 K, TMS): δ = 0.76 (s, 6H), 1.09 (m, 10H), 1.49–1.81 (m, 10H), 2.64 (m, 4H), 2.91 (broad, 2H), 4.66 (t, J = 10.2 Hz, 2H), 4.81 (m, 2H), 7.08–7.12 (m, 2H), 7.17–7.21 (m, 4H), 7.29–7.34 (m, 4H) ppm. **$^{13}C\{^1H\}$ NMR** (75.66 MHz, DMSO-d₆, 296.6 K, TMS): δ = 23.84 (s), 25.50 (s), 25.66 (s), 35.59 (d, $^3J(P,C)$ = 5.3 Hz), 35.75 (d, $^3J(P,C)$ = 4.5 Hz), 36.52 (t, $^3J(P,C)$ = 4.5 Hz), 48.01 (s), 50.58 (s), 120.98 (d, $^3J(P,C)$ = 4.5 Hz), 121.00 (d, $^3J(P,C)$ = 4.5 Hz), 123.90 (s), 129.63 (s), 152.36 (d, $^2J(P,C)$ = 6.8 Hz).

بحث و نتیجه گیری:

بررسی داده‌های بلورنگاری:

این ترکیب در سیستم بلوری مونوکلینیک با گروه فضایی $P2_1/n$ متبلور می‌شود و واحد بی تقارن شامل یک مولکول کامل است (شکل ۲). طول و زوایای پیوند انتخابی و پارامترهای هندسی پیوند هیدروژنی در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است.

در این ترکیب، اتم‌های فسفر در یک محیط چهاروجهی $(N)(N)(O)P(O)$ منحرف شده قرار دارد و حداکثر و حداقل زاویه‌های پیوندی در اتم فسفر $P1$ ، $O=P-N$ و $O-P-N$ می‌باشد. گروه‌های OC_6H_5 و $C_6H_{11}NH$ متصل به $P2$ اختلال موقعیتی را با اشغال $(3)/417/0/583$ نشان می‌دهند. در این مولکول، دو قطعه $(C_6H_5O)P(O)(NH-cyclo-C_6H_{11})$ از طریق یک اتصال دهنده $NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NH$ پل می‌شوند. نزدیکترین ساختار به این ترکیب، ساختار $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)N$ می‌باشد که شامل دی آمین پل‌ساز حاصل از آمین نوع دوم است.¹⁰

به طور کلی، تمام طول و زوایای پیوند در مقادیر مورد انتظار مشاهده شده در ساختارهای مشابه ایجاد شده با این اتم‌ها هستند، برای مثال، طول پیوند $P1=O1$ و $P2=O3$ به ترتیب برابر با $1/477$ و $1/447$ آنگستروم می‌باشد.¹⁰

در ساختار بلوری، مولکول‌ها در یک الگوی پیوند هیدروژنی دوبعدی موازی صفحه $(10-1)$ و از طریق تشکیل گروه‌بندی $(N-H\cdots OP)(N-H\cdots OP)$ توسط اتم $P1$ و پیوند هیدروژنی $N-H\cdots OP$ توسط اتم $P2$ متصل می‌شوند. این الگو شامل موتیف‌های $S(8)$ و $R_2^2(8)$ است (شکل ۳). در ساختار هم خانواده گفته شده نیز مولکول‌ها در یک تجمع دو بعدی با تشکیل پیوندهای هیدروژنی $N-H\cdots OP$ ارتباط دارند و در آن مشابه ترکیب جدید تهیه شده اتم‌های اکسیژن استری و نیتروژن نقشی در پیوندهای هیدروژنی به عنوان پذیرنده ندارند.¹⁰

تجزیه و تحلیل سطح هیرشفلد

سطح هیرشفلد نمایشی برای ترسیم حضور یک مولکول در یک بلور و تقسیم چگالی الکترون بلور به قطعات مولکولی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، برهمکنش‌های بین مولکولی را به همراه نمودارهای اثر انگشت دوبعدی نشان می‌دهد.¹² نواحی قرمز روی سطوح هیرشفلد نشان‌دهنده تماس‌های نزدیک است که در آن فواصل کوتاه‌تر از مجموع شعاع‌های واندروالس است، در حالی که بخش‌های سفید تا آبی نشان‌دهنده فواصل بزرگ‌تر از این مجموع هستند.¹³ با توجه به وجود اختلال در آنالیز پرتو ایکس، در بررسی‌های هیرشفلد این ترکیب از داده‌های جزء عمده استفاده شده است.

در شکل ۴، برهمکنش‌های بین مولکولی این ترکیب با استفاده از سطح هیرشفلد بر مبنای d_{norm} نشان داده شده است. در این شکل پیوندهای هیدروژنی با قدرت متوسط $N-H\cdots OP$ به صورت ناحیه‌های قرمز پررنگ و پیوندهای هیدروژنی ضعیف $C-H\cdots \pi$ به صورت ناحیه‌های قرمز روشن مشاهده می‌شود.

نمودارهای اثر انگشت دوبعدی و درصد تماس‌های مختلف اتم-اتم در شکل ۵ نشان داده شده است. این نمودارها، از برهمکنش‌های بین مولکولی در بلور و داده‌های تصویری خلاصه شده از تکرار d_i و d_e در سراسر سطح یک مولکول است. d_i و d_e به ترتیب فاصله یک نقطه از سطح هیرشفلد تا نزدیکترین اتم خارجی و فاصله یک نقطه از سطح هیرشفلد تا نزدیکترین اتم داخلی را نشان می‌دهد. هر نقطه در نمودار اثر انگشت دوبعدی مربوط به d_i و d_e است و رنگ هر ناحیه نشان‌دهنده مساحت سطح نسبی این دو است. تجزیه نمودارهای اثر انگشت امکان مشخص کردن سهم هر برهمکنش، که معمولاً در اثر انگشت کامل همپوشانی دارند، را می‌دهد.¹²

بیشترین سهم برهمکنش مشاهده شده مربوط به برخوردهای $H\cdots H$ است و سهم $86/4$ درصد از کل برهمکنش‌ها را دارد. تماس‌های $O\cdots H/H\cdots O$ نزدیک‌ترین برهمکنش‌ها با حداقل $d_i + d_e$ برابر $1/4$ را نشان می‌دهد که به شکل دو علامت تیز مجزا دیده می‌شود.

این برهم کنش ۹/۲ درصد از کل برهمکنش‌های این ترکیب را شامل می‌شود. برهم کنش‌های $C\cdots H$ و $H\cdots C$ ۳/۹ درصد کل برهمکنش‌ها می‌باشد و مربوط به برخوردهای $\pi\cdots H/H\cdots\pi$ است که می‌تواند به صورت بال‌های مشخص در نمودار مربوطه دیده شود. برهمکنش‌های $N\cdots H$ و $H\cdots N$ ۰/۴ درصد از کل برهمکنش‌ها می‌باشد.

مطالعه NMR

علامت فسفر (^{31}P NMR) در ۱۳/۰۴ ppm ظاهر می‌شود. در طیف 1H NMR، سه‌تایی در ۴/۶۶ ppm ($J = 10/2$ Hz) و چندتایی در ۴/۸۱ ppm مربوط به واحدهای NH بخش‌های $C_6H_{11}NH$ و $NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NH$ است.

در طیف ^{13}C NMR، دوتایی‌ها در ۳۵/۵۹ ppm ($J = 5/3$ Hz) و ۳۵/۷۵ ppm ($J = 4/5$ Hz) مربوط به اتم‌های کربن قطعه سیکلوهگزیل با سه پیوند فاصله از فسفر می‌باشند. سه‌تایی در ۳۶/۵۲ ppm ($J = 4/5$ Hz) مربوط به اتم کربن قطعه $NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NH$ با سه پیوند فاصله از دو اتم فسفر است. اتم‌های کربن ارتو گروه‌های C_6H_5O دو دوتایی در ۱۲۰/۹۸ و ۱۲۱/۰۰ ppm ($J = 4/5$ Hz) برای هر دو) و و اتم کربن ایپسو یک دوتایی در ۱۵۲/۳۶ ppm ($J = 6/8$ Hz) نشان می‌دهند.

برداشت:

مجموعه مولکولی $(C_6H_5O)(C_6H_{11}NH)P(O)NHCH_2C(CH_3)_2CH_2NHP(O)(NHC_6H_{11})(OC_6H_{11})$ مورد بحث قرار گرفت. در این ترکیب یک الگوی پیوند هیدروژنی دوبعدی موازی با صفحه (10-1) دیده می‌شود. نقشه سطح هیرشفلد، تماس‌های نزدیک $H\cdots O$ را به صورت ناحیه قرمز تیره و تماس‌های ضعیفتر $C-H\cdots\pi$ را به صورت ناحیه قرمز روشن نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای اثر انگشت، برهمکنش‌های $H\cdots H$ سهم قابل توجهی را در این ساختار دارد و پس از آن برهم کنش‌های $H\cdots O$ و $H\cdots C$ بیشترین سهم را دارند.

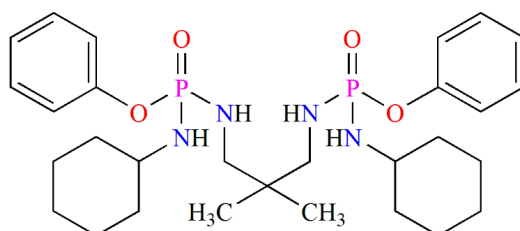
قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه فردوسی مشهد (۳/۵۷۰۷۶ و ۳/۴۱۹۲۷) و مسئولین محترم مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران نهایت سپاس و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- (1) Domínguez, M. J.; Sanmartín, C.; Font, M.; Palop, J. A.; San Francisco, S.; Urrutia, O.; Houdusse, F.; García-Mina, J. M. Design, Synthesis, and Biological Evaluation of Phosphoramidate Derivatives as Urease Inhibitors. *J. Agric. Food Chem.* **2008**, *56* (10), 3721–3731.
<https://doi.org/10.1021/jf072901y>.

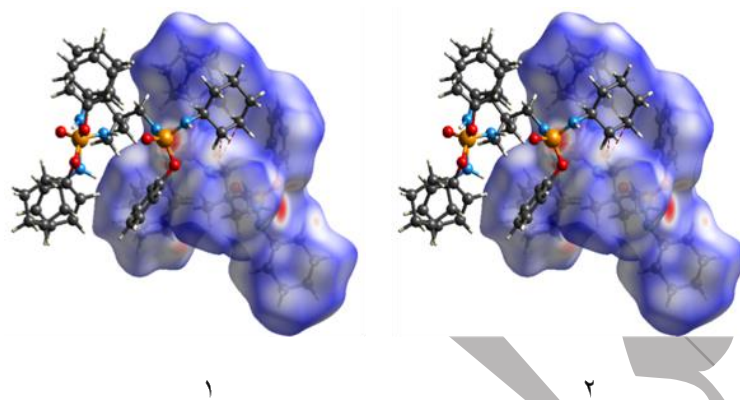
- (2) Sharifi, M.; Ghadamyari, M.; Gholivand, K.; Ebrahimi Valmoozi, A. The Study of Insecticidal Effect of New Phosphoramidate Compounds on Some Insect Pests. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)* **2016**, 39 (3), 39–49. <https://doi.org/10.22055/ppr.2016.12394>.
- (3) Itumoh, E. J.; Data, S.; Leita, E. M. Opening up the Toolbox: Synthesis and Mechanisms of Phosphoramidates. *Molecules* **2020**, 25 (16), 3684. <https://doi.org/10.3390/molecules25163684>.
- (4) Zhu, Y.-Y.; Niu, Y.; Niu, Y.-N.; Yang, S.-D. Recent Advances in the Synthesis and Applications of Phosphoramides. *Org. Biomol. Chem.* **2021**, 19 (47), 10296–10313. <https://doi.org/10.1039/D1OB01566D>.
- (5) Yu, H.; Yang, H.; Shi, E.; Tang, W. Development and Clinical Application of Phosphorus-Containing Drugs. *Medicine in Drug Discovery* **2020**, 8, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.medidd.2020.100063>.
- (6) Li, M.; Chen, Y.; Kong, Z.; Sun, Z.; Qian, L. Impact of a Novel Phosphoramidate Flame Retardant on the Fire Behavior and Transparency of Thermoplastic Polyurethane Elastomers. *ACS Omega* **2023**, 8 (20), 18151–18164. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01464>.
- (7) Sabbaghi, F.; Pourayoubi, M.; Nečas, M.; Damodaran, K. Two Single-Enantiomer Amido-phospho-esters: A Database Study on the Chirality of (O)2P(O)(N)-Based Structures. *Acta Cryst C* **2019**, 75 (1), 77–84. <https://doi.org/10.1107/S205322961801673X>.
- (8) Toghræe, M.; Pourayoubi, M.; Divjakovic, V. Study on H-Bond Patterns in Phosphoric Triamides Having a P(O)NHC(O) Skeleton, a *Gauche* Orientation of P(O) vs C(O) in New Compounds. *Polyhedron* **2011**, 30 (10), 1680–1690. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2011.03.045>.
- (9) Gryshkun, E. V.; Andrushko, N. V.; Kolodiazhnyi, O. I. Stereoselective Reactions of Chiral Amines with Racemic Chlorophosphines. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements* **2004**, 179 (6), 1027–1046. <https://doi.org/10.1080/10426500490459650>.
- (10) Pourayoubi, M.; Karimi Ahmadabad, F.; Eshtiagh-Hosseini, H.; Kučeráková, M.; Eigner, V.; Dušek, M. New Rac-XP(O)(OC₆H₅)(NHC₆H₄-p-CH₃) [X = N(CH₃)(Cyclo-C₆H₁₁) and NH(C₃H₅)] and Rac-(C₆H₅CH₂NH)P(O)(OC₆H₅)(NH-Cyclo-C₆H₁₁) Mixed-Amide Phosphinates. *Acta Cryst C* **2013**, 69 (10), 1181–1185. <https://doi.org/10.1107/S010827011302341X>.
- (11) Keikha, M.; Pourayoubi, M.; Tarahhomi, A.; Lee, A. van der. Syntheses and Structures of Four New Mixed-Amide Phosphoric Tri-amides. *Acta Cryst C* **2016**, 72 (3), 251–259. <https://doi.org/10.1107/S2053229616001595>.
- (12) Spackman, M. A.; Jayatilaka, D. Hirshfeld Surface Analysis. *CrystEngComm* **2009**, 11 (1), 19–32. <https://doi.org/10.1039/B818330A>.
- (13) Gomes, L. R.; Souza, M. V. N. de; Da Costa, C. F.; Wardell, J. L.; Low, J. N. Crystal Structures and Hirshfeld Surfaces of Four Meth-oxy-benzaldehyde Oxime Derivatives, 2-MeO-XC₆H₃C=NOH (X = H and 2-, 3- and 4-MeO): Different Conformations and Hydrogen-Bonding Patterns. *Acta Cryst E* **2018**, 74 (11), 1553–1560. <https://doi.org/10.1107/S2056989018014020>.



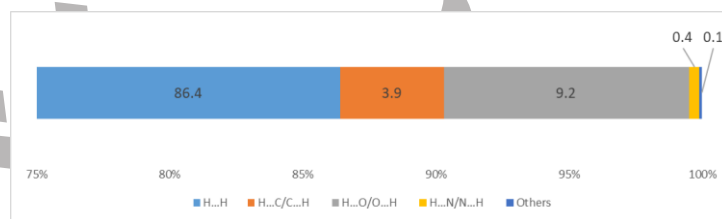
شکل ۱: ساختار شیمیایی ۲-دی متیل، ۱-۳-پروپان دی آمین، N و N-بیس((فنیل - O)) (سیکلوهگزیل آمیدو) فسفینات



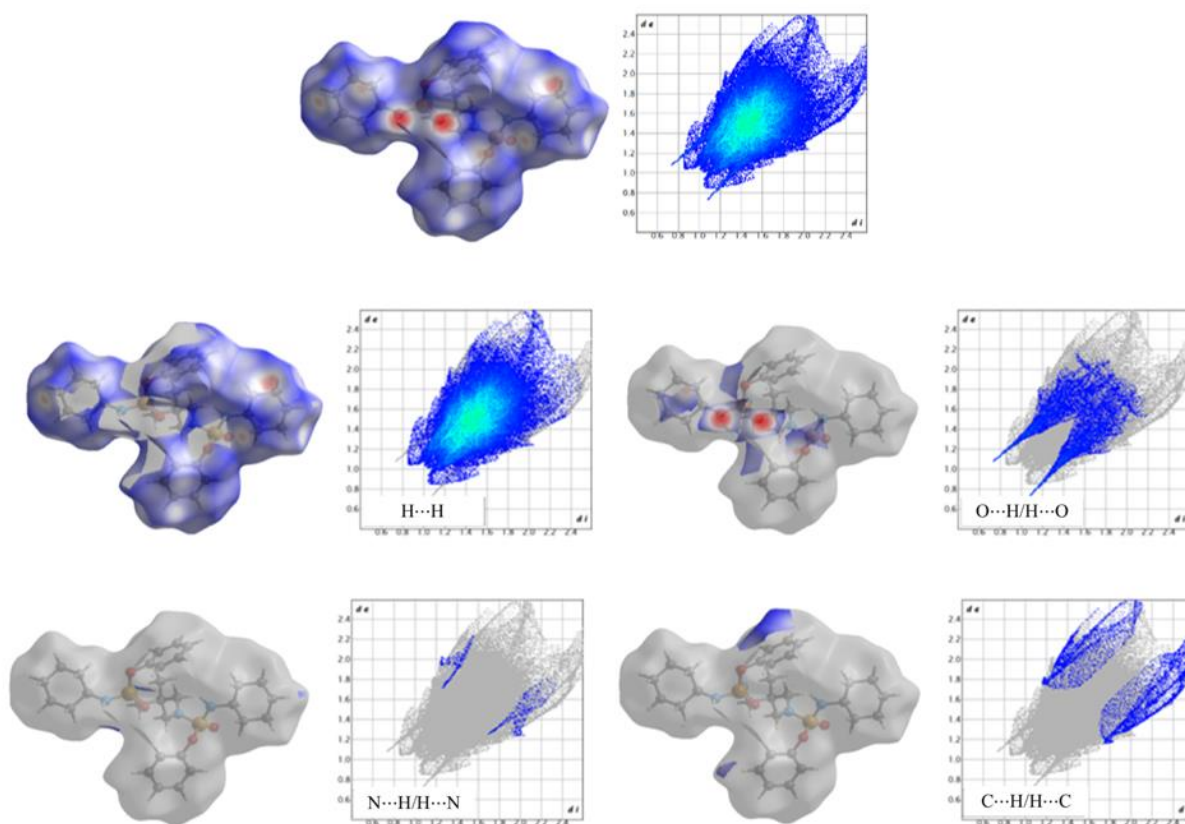
شکل ۳: الگوی پیوند هیدروژنی



شکل ۴: نقشه‌های سطح هیرشفلد d_{norm} -۱ نشاندهنده پیوند هیدروژنی قوی $\text{N-H}\cdots\text{OP}$ و -۲ نشاندهنده پیوند $\text{C-H}\cdots\pi$



درصد برهمکنش‌ها در ترکیب تهیه شده



شکل ۵: درصد برهمکنش‌ها در ترکیب تهیه شده و نقشه‌های دوبعدی اثر انگشت کامل و تجزیه شده به برهمکنش‌های OH/HO , H/H , NH/HN و CH/HC که درصد توزیع برهم کنش به کل سطح هیرشفلد مولکول را نشان می‌دهد.

جدول ۱: داده های بلورنگاری و حل ساختار ترکیب تهیه شده

۵۷۶/۶۴	جرم فرمولی
۱۲۰ (۲) K	دما (کلوین)
$\text{C}_{29}\text{H}_{46}\text{N}_4\text{O}_4\text{P}_2$	فرمول تجربی
$0.71073 \text{ \AA}$	طول موج

سیستم بلوری	مونوکلینیک
گروه فضایی	P21/n
ابعاد سلول واحد	$a = 13/4560$ (۴) Å, $\alpha = 90^\circ$, $b = 15/1852$ (۴) Å, $\beta = 99/653$ (۳)°, $c = 15/5631$ (۵) Å, $\gamma = 90^\circ$
حجم	$3135/01$ (۱۶) Å ³
Z	۴
دانشیته (محاسباتی)	$1/222$ gcm ⁻³
ضریب جذب	$0/177$ mm ⁻¹
F(000)	۱۲۴۰
اندازه بلور	$0/60 \times 0/45 \times 0/40$ mm
رنگ بلور	سفید، شکل چندضلعی
گستره تتا برای جمع آوری داده	۲۷/۵۶۴۶ تا ۲/۹۷۰۷ درجه
محدوده‌های شاخص	$-16 \leq h \leq 16$, $-14 \leq k \leq 18$, $-12 \leq l \leq 18$
بازتاب‌های جمع آوری شده	۱۲۵۴۶
بازتاب‌های مستقل	5502 [R(int) = $0/152$]
تصحیح جذب	نیمه تجربی از اکی والان‌ها
بیشینه و کمینه عبور	$0/9324$ و $0/9010$
روش حل ساختار	حداقل مربعات ماتریس کامل در F2
داده/بازداری/پارامترها	$5502/234/497$
میزان انطباق در F2	$1/061$
شاخص‌های R نهایی [$I > 2\sigma(I)$]	$R1 = 0/0405$, $wR2 = 0/1042$
شاخص‌های R (همه داده‌ها)	$R1 = 0/0543$, $wR2 = 0/1077$
شماره CCDC	۲۳۹۶۳۴۲

جدول ۲: برخی از طول پیوندها (بر حسب Å) و زوایای پیوندی (بر حسب درجه)

پیوند	طول در مولکول	پیوند	زاویه در مولکول
P1-O1	$1/4766$ (۱۳)	O1-P1-O2	$112/27$ (۷)
P1-O2	$1/6060$ (۱۳)	O1-P1-N2	$113/72$ (۸)
P1-N1	$1/6246$ (۱۶)	O1-P1-N1	$111/57$ (۸)
P1-N2	$1/6198$ (۱۶)	O2-P1-N2	$103/06$ (۸)
P2-O3	$1/4468$ (۱۴)	O3-P2-O4A	$124/93$ (۱۶)
P2-O4A	$1/523$ (۵)	O3-P2-N3	$114/43$ (۹)

۱۰۶/۰۶ (۱۳)	O3-P2-N4A	۱/۶۶۲ (۳)	P2-N4A
۱۰۱/۱۹ (۱۸)	O4A-P2-N3	۱/۶۰۳۱ (۱۹)	P2-N3

جدول ۳: ژئومتری پیوند هیدروژنی (Å, °)

D-H...A	D-H	H...A	D...A	D-H...A
N2-H2N...O3 (-x + 1/2, y + 1/2, -z + 3/2)	۰/۸۲۸ (۱۴)	۲/۰۲۰ (۱۵)	۲/۸۴۷ (۲)	۱۷۵/۹ (۱۹)
N3-H3N...O1	۰/۸۵۶ (۱۵)	۲/۰۱۰ (۱۷)	۲/۸۳۳ (۲)	۱۶۱ (۲)
N1-H1N...O1(-x, -y + 1, -z + 1)	۰/۸۳۹ (۱۵)	۲/۱۲۵ (۱۶)	۲/۹۱۹۳ (۱۹)	۱۵۷/۹ (۱۹)

Preparation, crystal structure investigation and Hirshfeld surface analysis of a new racemic amidophosphoester compound

Ali Kalateh^a, Mehrdad Pourayoubi^{a,*}, Fatemeh Karimi Ahmadabad^a, Marek Nečas^b

^aDepartment of Chemistry, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

^bDepartment of Chemistry, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlarska 2, Brno CZ-61137, Czech Republic.

Correspondence e-mail: pourayoubi@um.ac.ir

Abstract:

A new racemic compound of 2,2-dimethyl-1,3-propanediamine, N,N-bis((O-phenyl)(cyclohexylamido)phosphinate), $(\text{C}_6\text{H}_5\text{O})(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NH})\text{P}(\text{O})\text{NHCH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{NHP}(\text{O})(\text{NHC}_6\text{H}_{11})(\text{OC}_6\text{H}_5)$, was synthesized and studied by X-ray diffraction and spectroscopic methods. In the crystal structure, the molecules are assembled in a two-dimensional array parallel to the (10-1) plane through $\text{NH}\cdots\text{OP}$ hydrogen bonds. The compound crystallizes in the monoclinic crystal system with space group $P2_1/n$ and the asymmetric unit is composed of one molecule. Hirshfeld surface analysis and the fingerprint diagrams are discussed.

Keywords: Amidophosphoester, crystal structure, hydrogen bond, Hirshfeld analysis.