

سنتز و شناسایی دو ترکیب جدید فسفریک تری آمید: مطالعه ساختاری

OP(NHC₅H₉)₃عاتکه سادات ترحمی^{۱*}، مهرداد پورایوبی^۲، جیمز آ. گولن^۳ و آرنلد ال. رینگلد^۳^۱دانشکده شیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران^۲گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران^۳گروه شیمی، دانشگاه کالیفرنیا، سن دیگو، ایالات متحده آمریکا

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۳

تاریخ تصحیح: ۹۵/۰۹/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۰۹

چکیده

در کار حاضر، سنتز و شناسایی دو ترکیب جدید فسفریک تری آمید: یک کمپلکس آهن (III)، $(NO_3)_3Fe[OP(NC_5H_{10})_3]_2$ (ترکیب ۱) و یک لیگاند فسفریک تری آمید، $OP(NHC_5H_9)_3$ (ترکیب ۲)، بررسی می شوند. ساختار بلوری ترکیب ۲ توسط آزمایش بلورنگاری پراش پرتوی X تعیین شده است. برای ترکیب ۱ نیز داده‌های بلورنگاری در دمای (۲) ۱۰۰ درجه کلوین جمع آوری شد (سیستم بلوری مونوکلینیک با گروه فضایی $P2_1/c$ و پارامترهای سلول واحد $a = 11/5257$ (۶) Å $b = 15/7698$ (۵) Å $c = 14/2471$ (۴) Å $\beta = 106/7950$ (۲)° $V = 39847$ (۲) Å³ $Z = 4$) که ساختار این ترکیب فرمول $(NO_3)_3Fe[OP(NC_5H_{10})_3]_2$ را تایید می کند ولی به دلیل کیفیت پائین و خطای زیاد، این داده ها در این مقاله ارائه نمی شوند. در ساختار ترکیب ۲، واحد بی تقارن شامل یک مولکول کامل است و مولکول های مجاور از طریق پیوندهای هیدروژنی $[N-H]_2 \cdots O=P$ در یک آرایش خطی موازی با محور b به یکدیگر متصل می شوند. در این برهمکنش ها گروه $P=O$ به عنوان یک گیرنده دوتائی پیوند هیدروژنی عمل می کند.

واژگان کلیدی: ساختار بلوری، فسفریک تری آمید، واحد بی تقارن، پیوند هیدروژنی $[N-H]_2 \cdots O=P$

۱- مقدمه

فسفریک تری آمیدها با فرمول کلی $P(O)[NR^1R^2]_3$ ($R^1 \& R^2 = H \text{ or } \neq H$) زیرمجموعه ای از خانواده بزرگ فسفرآمیدها با اسکلت اصلی $O=P-N$ هستند. فسفرآمیدها در دهه های اخیر، رشد و پیشرفت قابل ملاحظه ای به دلیل کاربردهای فراوان در زمینه های مختلف از جمله پزشکی (داروهای ضد تومر [۱] و ضد سرطان [۲])، کشاورزی (حشره کش، قارچ کش و ضد آفت [۳،۴]) و صنعتی (تهیه ترکیبات روان کننده [۵] و مواد ضد اشتعال [۶]) پیدا کرده اند. به علاوه، این ترکیبها می توانند به عنوان لیگاندهای دهنده ی اکسیژن در واکنش با یون های فلزی گوناگون [۷-۹]، به ویژه فلزات سنگین [۱۰، ۱۱]، مورد استفاده قرار گیرند.

تاکنون ساختارهای زیاد و متنوعی از فسفریک تری آمیدها [۱۲-۱۴] و نیز کمپلکس های آنها [۸، ۹، ۱۵-۱۸] گزارش شده است و مطالعات ساختاری مختلفی بر روی آنها به وسیله داده های به دست آمده از آزمایش های بلورنگاری پرتوی X (به ویژه با استفاده از پایگاه داده های ساختاری کمبریج^۱ [۱۹]) انجام شده است. از آن جمله می توان به مطالعه قدرت و الگوی پیوندهای هیدروژنی [۲۰-۲۲]، مطالعه پارامترهای ساختاری مانند طول پیوندهای P—N و محیط و هندسه اطراف اتم های نیتروژن [۲۳]، مقایسه زاویه های پیوندی C—N—C و P—N—C در فسفریک تری آمیدها با اسکلت $C(O)NHP(O)[N(C)(C)]_2$ [۲۴] و مطالعه برهم کنش های بین مولکولی (کووالانسی و غیر کووالانسی) در فسفریک تری آمیدها [۲۵] و ترکیب های کئوردینه آن ها [۲۶، ۸] به وسیله تجزیه و تحلیل سطح هرفلد^۲ اشاره کرد.

در این مقاله، سنتز دو ترکیب جدید از خانواده فسفریک تری آمیدها شامل یک کمپلکس آهن (III)-فسفریک تری آمید و یک لیگاند فسفریک تری آمید گزارش شده است و ساختار بلوری آن ها با استفاده از بلورنگاری پرتوی X تعیین شده است. گرچه، در مورد ترکیب ۱، داده های بلورنگاری به دلیل کیفیت پائین و خطای زیاد ارائه نمی شوند. در ادامه، ویژگی های ساختاری ترکیب ۲ و الگوی پیوندهای هیدروژنی در شبکه بلوری آن ارائه می شوند.

۲- روش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و دستگاه ها

تمامی مواد شیمیایی، شامل فسفریل کلرید، سیکلو پنتیل آمین، پی پیریدین، نیترات آهن ۹ آب و حلال های مورد استفاده در این تحقیق با درجه ی خلوص سنتزی از شرکت مرک و آلدریچ خریداری شدند. طیف های IR توسط دستگاه طیف سنج مادون قرمز Buck 500 و با استفاده از قرص پتاسیم برمید ثبت شده اند. آنالیز عنصری (C, H, N) برای ترکیب ۱ با استفاده از یک آنالیزور عنصری Thermo Finnigan Flash 1112EA انجام شده است.

۲-۲- سنتز

۲-۲-۱- سنتز کمپلکس تری-نیتراتو-ترانس-بیس[تریس(پی پیریدین-۱-ایل)فسفین اکسید-kO] آهن (III) (ترکیب ۱)

برای تهیه لیگاند فسفریک تری آمید مورد استفاده در سنتز این کمپلکس $(OP(NC_5H_{10})_3)$ ، به محلول فسفریل کلرید (۴ میلی مول) در ۲۰ میلی لیتر استونیتریل، محلولی از پی پیریدین (۲۴ میلی مول) در ۱۵ میلی لیتر از همان حلال، در دمای $0^\circ C$ و به آرامی افزوده شد. بعد از هم خوردن به مدت ۴ ساعت رسوبات حاصل (نمک آمینی $C_5H_{10}NH.HCl$) صاف شد. سپس

¹ Cambridge Structural Database

² Hirshfeld surface analysis

حلال واکنش در محلول زیر صافی تحت خلأ و با استفاده از تله‌ی ازت مایع حذف شد و ماده حاصل به عنوان لیگاند بدون خالص‌سازی در مرحله بعد (تهیه کمپلکس) مورد استفاده قرار گرفت.

در مرحله بعد، برای تهیه کمپلکس ۱، به محلول لیگاند فسفریک تری آمید تهیه شده $(OP(NC_5H_{10})_3)$ (۲ میلی مول + مقداری اضافی) در متانول، محلولی از $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (یک میلی مول) در متانول/استونیتریل با نسبت حجمی ۱:۱ قطره قطره و به آرامی افزوده شد. مخلوط حاصل در شرایط بازروانی و در دمای حدود $80^\circ C$ به مدت ۲ روز به هم زده شد. بلورهای مناسب این ترکیب از تبخیر آرام محلول واکنش در دمای محیط به دست آمدند.

Anal. Calc. for $C_{30}H_{60}N_9O_{11}P_2Fe$ (840.66): C, 42.86; H, 7.19; N, 15.00. Found: C, 42.68; H, 7.04; N, 14.98. IR (KBr, $\bar{\nu}$, cm^{-1}): 2966, 2865, 1649, 1567, 1385, 1207, 1148, 1087, 1021.

۲-۲-۲- سنتز لیگاند N''', N', N -تری سیکلو پنتیل فسفریک تری آمید (ترکیب ۲)

به محلول فسفریل کلرید (۴ میلی مول) در ۳۰ میلی لیتر کلروفرم، محلولی از سیکلوپنتیل آمین (۲۴ میلی مول) در ۱۵ میلی لیتر از همان حلال، در دمای $0^\circ C$ و به آرامی افزوده شد. مخلوط حاصل به مدت ۴ ساعت هم زده شد. سپس حلال واکنش در دمای محیط تبخیر و جامد به دست آمده برای خالص سازی و حذف نمک آمینی ($C_5H_9NH_2 \cdot HCl$) با آب مقطر شستشو داده شد. تک بلورهای این ترکیب از تبخیر آرام مخلوط حلال‌های متانول/استونیتریل/دی‌متیل فرمامید با نسبت حجمی ۴:۴:۱ در دمای محیط به دست آمدند.

IR (KBr, cm^{-1}): 3227 (N-H), 2953, 2873, 1438, 1286 (P=O), 1172, 1106, 906, 678.

۲-۳- تعیین ساختار بلوری

داده های بلورنگاری پراش پرتوی X برای ترکیب ۲ در دمای K (۲) 100° و با استفاده از دستگاه پراش Bruker APEXII مجهز شده به یک آشکارساز CCD و تکفام ساز گرافیتی $MoK\alpha$ ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$) جمع آوری شدند. یکپارچه سازی داده ها و تصحیح جذب عددی آنها با استفاده از نرم افزار SADABS انجام شد [۲۷]. ساختارهای بدست آمده با استفاده از روش مستقیم در نرم افزار SHELXS-97 حل شدند و پالایش^۱ آنها با استفاده از نرم افزار SHELXL-97 انجام شد [۲۸]. کلیه اتمهای غیر هیدروژنی با استفاده از مجذور مربعات ماتریکس کلی بر پایه F^2 به صورت آنیزوتروپی^۲ پالایش شدند. اتمهای هیدروژن N-H از یک نقشه فوریه^۳ متفاوت پیدا شدند و به صورت ایزوتروپی با فاصله $0.187 (0.02) \text{ \AA}$ و $N-2H = 0.187 (0.02) \text{ \AA}$ پالایش شدند. کلیه اتم های هیدروژن

¹ Refinement

² Anisotropically

³ Fourier map

باقیمانده در مکانهایی که بطور محاسباتی بدست آورده شدند، با استفاده از پارامترهای متغیر^۱ مناسب (\AA ۰/۹۹۰) برای CH_2 و \AA ۱/۰۰۰ برای CH و $U_{\text{iso}} = 1.2U_{\text{eq}}$ قرار گرفتند.

داده های بلورنگاری مربوط به ترکیب ۲ در جدول ۱ آورده شده است. شکل های فضایی نمایش داده شده در این مقاله نیز با استفاده از نرم افزارهای *SHELXTL* [۲۹] و *Mercury* [۳۰] ترسیم شده اند.

جدول ۱. داده های بلورنگاری برای ترکیب ۲

Empirical formula	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{N}_3\text{OP}$
Formula weight	299.39
Temperature (K)	100 (2)
Wavelength (\AA)	0.71073
Crystal system	Monoclinic
Space group	$P2_1$
Unit cell dimensions	$a = 10.971$ (9) \AA ; $b = 7.513$ (5) \AA ; $c = 11.147$ (8) \AA $\beta = 117.69$ (3) $^\circ$
Volume (\AA^3)	813.6 (10)
Z	2
Calculated density (g/cm^3)	1.222
Absorption coefficient (mm^{-1})	0.170
$F(000)$	328
Crystal size (mm^3)	$0.15 \times 0.08 \times 0.05$
Crystal color / habit	colourless / blade
Theta range for data collection ($^\circ$)	2.06 to 26.65
Index ranges	$-12 \leq h \leq 13$; $-9 \leq k \leq 9$; $-13 \leq l \leq 13$
Reflections collected	5266
Independent reflections	2820 [$R_{\text{int}} = 0.0244$]
Completeness to $\theta = 25.00^\circ$	88.20%
Absorption correction	multi-scan / sadabs
Max. and min. transmission	0.9915 and 0.9749
Refinement method	Full-matrix least-squares on F^2
Data / restraints / parameters	2820 / 4 / 190
Goodness-of-fit on F^2	1.074
Final R indices [$I > 2\sigma(I)$]	$R_1 = 0.0471$, $wR_2 = 0.1163$
R indices (all data)	$R_1 = 0.0534$, $wR_2 = 0.1203$
Largest diff. peak and hole (e.\AA^{-3})	0.629 and -0.241

¹ Riding parameters

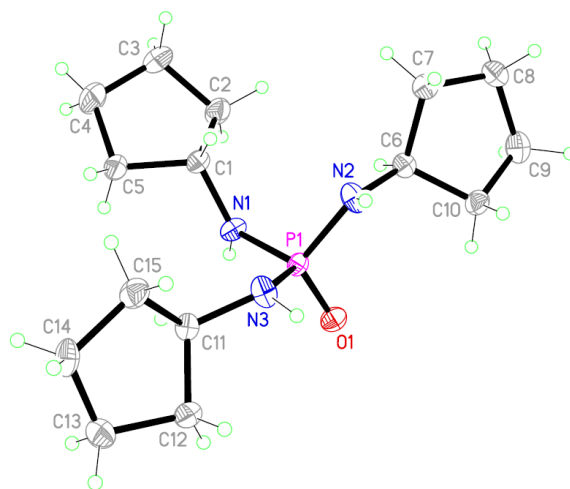
۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی ترکیب کمپلکس $(NO_3)_3Fe[OP(NC_5H_{10})_3]_2$ (ترکیب ۱):

کمپلکس ۱ با استفاده از لیگاند سنتز شده $OP(NC_5H_{10})_3$ تهیه شد. سپس، این ترکیب به وسیله ی روش های طیف سنجی مادون قرمز و آنالیز عنصری (C, H, N) شناسایی و سنتز آن تائید شد. به منظور مطالعه ی ساختاری، تلاش شد که آزمایش بلورنگاری پراش پرتوی X بر روی بلور این ترکیب انجام شود. داده‌های بلورنگاری جمع آوری شده در دمای (۲) ۱۰۰ درجه کلوین سیستم بلوری مونوکلینیک با گروه فضایی $P2_1/c$ و پارامترهای سلول واحد $a = 18/5257$ (۶) Å، $b = 15/7698$ (۵) Å، $c = 14/2471$ (۴) Å، $\beta = 106/7950$ (۲)°، $V = 39847$ (۲) Å³ و $Z = 4$ را نشان می دهد و فرمول $(NO_3)_3Fe[OP(NC_5H_{10})_3]_2$ برای این ترکیب را تایید می کند. گرچه، به دلیل کیفیت پائین و خطای زیاد، داده های بیشتری از بلورنگاری ارائه نمی شوند.

۳-۲- بررسی ساختار بلوری لیگاند $OP(NHC_5H_9)$ (ترکیب ۲):

ساختار مولکولی ترکیب ۲ در شکل ۱ و گزیده‌ای از طول، زاویه‌های پیوندی و زاویه‌های پیچشی آن در جدول ۲ و نیز پیوندهای هیدروژنی آن در جدول ۳ آورده شده است. واحد بی تقارن در این ترکیب شامل یک مولکول کامل می باشد.



شکل ۱- شمایی از ساختار مولکولی ترکیب ۲ به صورت بیضوی‌های گرمایی. بیضوی‌ها با احتمال ۵۰٪ و اتم‌های هیدروژن به صورت دایره‌های کوچک با شعاع قراردادی رسم شده‌اند.

در ساختار ۲، محیط اطراف اتم فسفر آرایش چهار وجهی انحراف یافته را دارد. طول پیوند فسفر-اکسیژن (۳) Å (۱/۴۹۸) بلندتر از طول پیوند $P=O$ (۱/۴۵ Å) است [۳۱]. همچنین، طول پیوندهای $P-N$ و زاویه‌های پیوندی $P-N-C$ (جدول ۲) در محدوده مقادیر مشاهده شده در ترکیب‌های مشابه می‌باشند [۳۲، ۲۲].

جدول ۲. طول (Å)، زاویه‌های پیوندی و زاویه‌های پیچشی (°) انتخاب شده در ترکیب ۲

P1-O1	1.498 (3)	N3-C11	1.475 (4)
P1-N1	1.631 (3)	N1-H1N	0.868 (19)
P1-N2	1.653 (3)	N2-H2N	0.860 (19)
P1-N3	1.656 (3)	N3-H3N	0.881 (19)
N1-C1	1.443 (5)	C1-H1A	1.000
N2-C6	1.462 (4)	C2-H2A	0.990
O1-P1-N1	108.25 (15)	N2-P1-N3	98.74 (15)
O1-P1-N2	113.69 (15)	C1-N1-P1	127.8 (2)
O1-P1-N3	117.79 (16)	C6-N2-P1	122.3 (2)
N1-P1-N2	109.14 (17)	C11-N3-P1	123.1 (2)
N1-P1-N3	108.74 (15)		
O1-P1-N1-C1	-159.6 (2)	O1-P1-N3-C11	-85.0 (3)
O1-P1-N2-C6	43.8 (3)		

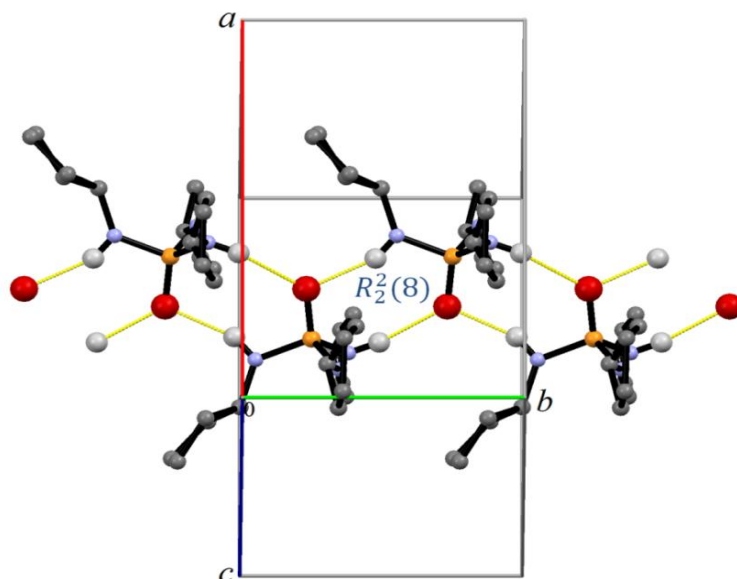
جدول ۳. پیوندهای هیدروژنی در ترکیب ۲

$D-H...A$	$d(D-H)$	$d(H...A)$	$d(D...A)$	$\angle(DHA)$
N1-H1N...O1#1	0.868 (19)	2.06 (2)	2.878 (4)	156 (4)
N3-H3N...O1#2	0.881 (19)	2.17 (2)	3.028 (4)	163 (3)

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms: #1: $-x + 1, y - \frac{1}{2}, -z + 1$; #2: $-x + 1, y + \frac{1}{2}, -z + 1$.

در ساختار ۲، دو اتم هیدروژن از سه گروه N—H که در موقعیت سین^۱ نسبت به گروه P=O قرار گرفته‌اند، در پیوندهای هیدروژنی $[N-H]_2 \cdots O=P$ (جدول ۳) شرکت می‌کنند. در این برهمکنش‌ها، گروه P=O به عنوان یک گیرنده دوتائی پیوند هیدروژنی عمل می‌کند. اتم هیدروژن در گروه N—H باقی مانده، در موقعیت گویچ^۲ نسبت به گروه P=O قرار گرفته است و در هیچ پیوند هیدروژنی شرکت نمی‌کند. سرانجام، پیوندهای هیدروژنی $[N-H]_2 \cdots O=P$ منجر به اتصال مولکول‌های مجاور به یکدیگر در یک آرایش خطی موازی با محور b (با ایجاد موتیف‌های حلقوی $R_2^2(8)$) می‌شوند (شکل ۲).

¹ *Syn*² *Gauche*



شکل ۲- شمایی از انباشتگی بلوری ایجاد شده به کمک پیوندهای هیدروژنی $[N—H]_2 \cdots O=P$ (نمایش داده شده به صورت خط چین‌های زرد رنگ) در ساختار ترکیب ۲، به صورت یک آرایش خطی موازی با محور b ، همراه با تشکیل موتیف‌های حلقوی $R_2^2(8)$. اتم‌های هیدروژن و اکسیژن درگیر در پیوندهای هیدروژنی به صورت گلوله‌هایی با اندازه بزرگ‌تر نمایش داده شده‌اند و دیگر اتم‌های هیدروژن، برای وضوح بیشتر، در شکل نشان داده نشده‌اند.

۴- نتیجه گیری

در این کار، دو ترکیب جدید فسفریک تری آمید شامل یک کمپلکس آهن (III) با اسکلت $(O)_6Fe\{O=P[N(C)(C)]_3\}_2$ (ترکیب ۱) و یک لیگاند با اسکلت $O=P[NH(C)]_3$ (ترکیب ۲) گزارش شدند. برای شناسایی اولیه این ترکیب‌ها از طیف سنجی IR و به منظور مطالعه ساختاری، ساختار ترکیب ۲ با استفاده از آزمایش بلورنگاری پراش پرتوی X تعیین شد. در بررسی ساختاری ترکیب ۲، شکل هندسی، طول پیوندها و زاویه‌های پیوندی اطراف اتم فسفر و نیز پیوندهای هیدروژنی در شبکه بلوری مورد مطالعه قرار گرفتند.

۵- اطلاعات تکمیلی

ساختار ۲ با کد ۱۴۹۵۵۱۷ در مرکز داده‌های بلورنگاری کمبریج (CCDC) ثبت شده است. اطلاعات تکمیلی ساختاری در رابطه با این ساختار در پایگاه اینترنتی www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif قابل دسترسی می‌باشد.

¹ Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC)

۶- مراجع

- [1] N.-H. Nam, Y. Kim, Y.-J. You, D.-H. Hong, H.-M. Kim, B.-Z. Ahn, *Bioorg. Med. Chem.* **11** (2003) 1021.
- [2] C. McGuigan, J.-C. Thiery, F. Daverio, W.G. Jiang, G. Davies, M. Mason, *Bioorg. Med. Chem.* **13** (2005) 3219.
- [3] H.R. Hudson, F. Ismail, M. Pianka, *Phosphorus, Sulfur, Silicon, Relat. Elem.* **173** (2001) 143.
- [4] V.M.R. dos Santos, C.M.R. Sant'Anna, G.E. Moya Borja, A. Chaaban, W.S. Côrtes, J.B.N. DaCosta, *Bioorg. Chem.* **35** (2007) 68.
- [5] V. Lintzenich, Patent. US3846317 A (1974).
- [6] P. Kannan, K. Kishro, *Polymer* **33** (1992) 418.
- [7] O.O. Litsis, V.A. Ovchynnikov, T.Y. Sliva, I.S. Konovalova, V.M. Amirkhanov, *Acta Crystallogr.* **E66** (2010) m426.
- [8] M. Pourayoubi, S. Shoghpour Bayraq, A. Tarahhomi, M. Nečas, K. Fejfarová, M. Dušek, *J. Organomet. Chem.* **751** (2014) 508.
- [9] A. Saneei, M. Pourayoubi, A. Crochet, K.M. Fromm, *Acta Crystallogr.* **C72** (2016) 230.
- [10] N.S. Kariaka, V.A. Trush, V.V. Medvediev, T.Y. Sliva, V.M. Amirkhanov, *Acta Crystallogr.* **E69** (2013) m143.
- [11] O.V. Amirkhanov, I.O. Marchenko, O.V. Moroz, T.Yu. Sliva, I.O. Fritsky, *Acta Crystallogr.* **E66** (2010) m640.
- [12] M. Keikha, M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, A. van der Lee, *Acta Crystallogr.* **C72** (2016) 251.
- [13] M. Pourayoubi, M. Keikha, A.L. Rheingold, J.A. Golen, *Acta Crystallogr.* **E68** (2012) o2266.
- [14] M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, A. Saneei, A.L. Rheingold, J.A. Golen, *Acta Crystallogr.* **C67** (2011) o265.
- [15] M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, J.A. Golen, A.L. Rheingold, *J. Coord. Chem.* Accepted for publication (2017).
- [16] K. Gholivand, H.R. Mahzouni, M.D. Esrafil, *Dalton Trans.* **41** (2012) 1597.
- [17] J. Legendziewicz, G. Oczko, V. Amirkhanov, R. Wiglusz, V.A. Ovchynnikov, *J. Alloys Compd.* **300–301** (2000) 360.
- [18] M. Pourayoubi, J.A. Golen, M. Rostami Chaijan, V. Divjakovic, M. Negari, A.L. Rheingold, *Acta Crystallogr.* **C67** (2011) m160.
- [19] F.H. Allen, *Acta Crystallogr.* **B58** (2002) 380.
- [20] M. Pourayoubi, M. Toghraee, V. Divjakovic, A. van der Lee, T. Mancilla Percino, M.A. Leyva Ramírez, A. Saneei, *Acta Crystallogr.* **B69** (2013) 184.
- [21] M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, A. Saneei, A.L. Rheingold, J.A. Golen, *Acta Crystallogr.* **C67** (2011) o265.

- [22] M. Pourayoubi, M. Toghraee, J. Zhu, M. Dušek, P.J. Bereciartua, V. Eigner, *CrystEngComm*, **16** (2014) 10870.
- [23] M. Pourayoubi, J.P. Jasinski, S. Shoghpour Bayraq, H. Eshghi, A.C. Keeley, G. Bruno, H. Amiri Rudbari, *Acta Crystallogr.* **C68** (2012) o399.
- [24] M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, A.L. Rheingold, J.A. Golen, *Acta Crystallogr.* **C70** (2014) 998.
- [25] A. Tarahhomi, M. Pourayoubi, J.A. Golen, P. Zargaran, B. Elahi, A.L. Rheingold, M.A. Leyva Ramírez, T. Mancilla Percino, *Acta Crystallogr.* **B69** (2013) 260.
- [26] M. Pourayoubi, A. Saneei, M. Dušek, S. Alemi Rostami, A. Crochet, M. Kučeraková, *J. Iran Chem. Soc.* **12** (2015) 2093.
- [27] G.M. Sheldrick, *SADABS*. (2004) University of Göttingen, Germany.
- [28] G.M. Sheldrick, *Acta Crystallogr.* **A64** (2008) 112.
- [29] G.M. Sheldrick, *Acta Crystallogr.* **C71** (2015) 3.
- [30] C.F. Macrae, I.J. Bruno, J.A. Chisholm, P.R. Edgington, P. McCabe, E. Pidcock, L. Rodriguez-Monge, R. Taylor, J. van de Streek, P.A. Wood, *J. Appl. Crystallogr.* **41** (2008) 466.
- [31] (a) D.E.C. Corbridge, “*Phosphorus: An Outline of its Chemistry, Biochemistry and Uses*”, Amsterdam: Elsevir, 5th Ed. (1995); (b) F.R. Hartley, “*The chemistry of organophosphorus compounds*”, John Wiley & Sons, New York (1990).
- [32] M. Pourayoubi, A. Tarahhomi, F. Karimi Ahmadabad, K. Fejfarová, A. van der Lee, M. Dušek, *Acta Crystallogr.* **C68** (2012) o164.

