



دانشگاه سام نور
په

شیمی فضایی

(رشته شیمی)

دکتر محمد صادقی دکتر حسین حسین زاده

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک‌درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید مواد و تجهیزات آموزشی

فهرست

۵	پیشگفتار مترجمین
یازده	پیشگفتار مؤلف
۱	فصل ۱. مولکول‌های ساده: هیبریداسیون، صورتبندی و پیکربندی
۱	اهداف
۱	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ هیبریداسیون: متان
۵	۳-۱ هیبریداسیون: اتن و آلکن‌ها
۷	۴-۱ هیبریداسیون: اتین
۹	۵-۱ اربیتال‌های پیوندی و ضد پیوندی
۹	۶-۱ صورتبندی: اتان
۱۳	۷-۱ صورتبندی پروپان و n -بوتان
۱۵	۸-۱ سیکلو هگزان: صورتبندی صندلی
۱۸	۹-۱ سیکلو هگزان: صورتبندی قایق
۲۰	۱۰-۱ وارونگی سیکلو هگزان
۲۲	۱۱-۱ سیکلو هگزان تک استخلافی
۲۵	خلاصه نکات کلیدی
۲۷	مراجع
۲۸	فصل ۲. مولکول‌های کایرال؛ یک مرکز فضایی
۲۸	اهداف
۲۸	۱-۲ کایرالیت، انانتیومر و فعالیت نوری
۳۴	۲-۲ روش تعیین پیکربندی
۳۴	۱-۲-۲ طرح فیشر
۳۷	۲-۲-۲ قرارداد CIP برای تعیین R/S
۴۲	۳-۲ انانتیومری مازاد، نسبت انانتیومری

۴۳	۲-۴ راسمیزه شدن
۴۵	۲-۵ مولکول‌های هموکایرال
۴۵	مسائل حل شده
۴۹	خلاصه نکات کلیدی
۵۰	مسائل
۵۲	مراجع

۵۳	فصل ۳. مولکول‌های حاوی دو (یا چند) مرکز فضایی
۵۳	اهداف
۵۳	۳-۱ آنانتیومرها و دیاسترومرها
۵۵	۳-۲ پیکربندی مزو
۵۸	۳-۳ پیکربندی اریترو / ترئو و سین / آنتی
۶۲	۳-۴ ترکیبات قفسی با دو کربن فضایی پل‌دار
۶۳	۳-۵ اپیمرها و نامگذاری ترکیبات دو حلقه‌ای
۶۶	۳-۶ جداسازی آنانتیومرها: تفکیک
۶۹	۳-۷ جداسازی آنانتیومرها توسط کروماتوگرافی
۷۰	۳-۸ تفکیک توسط آنزیم‌ها
۷۴	۳-۹ ساختار پلی پروپن
۷۵	مسائل حل شده
۸۰	خلاصه نکات کلیدی
۸۱	مسائل
۸۴	مراجع

۸۵	فصل ۴. شیمی فضایی پیوندهای دوگانه کربن-کربن و کربن-نیتروژن
۸۵	اهداف
۸۶	۴-۱ پیکربندی و پایداری نسبی آلکن‌ها و دی‌انها
۸۹	۴-۲ سیکلو هگزن

۹۰	۳-۴ پیوندهای دوگانه کربن- نیتروژن
۹۱	۴-۴ آمیدها
۹۵	۵-۴ هیدروکسیل دار کردن آلکن ها به صورت سیس
۹۶	۶-۴ هیدروکسیل دار کردن آلکن ها به صورت ترانس
۹۸	۷-۴ افزایش برم به آلکن ها
۱۰۲	۸-۴ آبدار شدن آلکن ها
۱۰۲	۴-۸-۱ جهت گیری مارکونیکوف
۱۰۳	۴-۸-۲ آبدار شدن به صورت آنتی مارکونیکوف
۱۰۵	مسائل حل شده
۱۰۸	خلاصه نکات کلیدی
۱۱۰	مسائل
۱۱۲	مراجع
۱۱۳	فصل ۵. کایرالیتیه بدون مرکز فضایی
۱۱۳	اهداف
۱۱۳	۵-۱ آلن ها و مولکول های مشابه
۱۱۷	۵-۲ بی فنیل ها
۱۲۰	۵-۳ پیکربندی مطلق آلن ها و بی فنیل ها
۱۲۰	۵-۳-۱ آلن ها
۱۲۲	۵-۳-۲ بی فنیل ها
۱۲۲	۵-۴ هگزا هلیسن
۱۲۳	۵-۵ ترکیبات سیلیسیم، ژرمانیم و قلع
۱۲۴	۵-۶ آمین ها، نمک های آمونیوم و ترکیبات فسفر و آرسنیک
۱۲۹	۵-۷ سولفوکسیدها، نمک های سولفونیوم و سلنوکسیدها
۱۳۲	مسائل حل شده
۱۳۶	خلاصه نکات کلیدی
۱۳۷	مسائل

۱۳۹	مراجع
۱۴۰	فصل ۶. ایزومری فضایی در ساختارهای حلقوی
۱۴۰	اهداف
۱۴۱	۶-۱ مولکول‌های حلقوی، تعیین پیکربندی و فشار حلقه‌ای
۱۴۲	۶-۲ سیکلوپروپان
۱۴۴	۶-۳ سیکلوبوتان
۱۴۵	۶-۴ سیکلوپنتان
۱۴۵	۶-۵ سیکلوهگزان
۱۴۶	۶-۵-۱ سیکلوهگزان‌های دو استخلافی
۱۴۷	۶-۵-۲ سیکلوهگزان‌هایی که در آنها هر دو استخلاف محوری باشند
۱۵۰	۶-۵-۳ سیکلوهگزان‌های دو استخلافی که در آنها، تنها یک استخلاف می‌تواند محوری باشد
۱۵۵	۶-۵-۴ سایر سیکلوهگزان‌های دو استخلافی
۱۵۸	۶-۵-۵ سیکلوهگزان‌های سه استخلافی
۱۵۹	۶-۶ دکالین‌ها
۱۵۹	۶-۶-۱ ترانس - دکالین
۱۶۰	۶-۶-۲ سیس - دکالین
۱۶۱	۶-۷ استروئیدها
۱۶۳	۶-۸ اثر آنومری
۱۶۹	مسائل حل شده
۱۷۴	خلاصه نکات کلیدی
۱۷۵	مسائل
۱۷۷	مراجع
۱۷۸	فصل ۷. واکنش‌های استخلافی بر روی کربن اشباع
۱۷۸	اهداف

۱۷۹	۱-۷ جایگزینی نوکلئوفیلی
۱۷۹	۱-۱-۷ واکنش S_N^2
۱۸۸	۲-۱-۷ واکنش $S_N 2'$
۱۹۰	۳-۱-۷ واکنش S_N^1
۱۹۲	۴-۱-۷ واکنش‌های S_N^1 همراه با حفظ پیکربندی
۱۹۶	مسائل حل شده
۱۹۸	خلاصه نکات کلیدی
۱۹۹	مسائل
۲۰۰	مراجع
۲۰۱	فصل ۸. پروکایرالیت، وجوه و گروه‌های انانتیوتوپیک و دیاستروتوپیک
۲۰۱	اهداف
۲۰۲	۱-۸ مولکول‌های پروکایرال، وجوه و گروه‌های انانتیوتوپیک
۲۰۲	۱-۱-۸ پروکایرالیت در کربن‌های هیبریدی sp^3
۲۰۳	۲-۱-۸ پروکایرالیت در کربن‌های sp^2
۲۰۶	۲-۸ ترکیبات دیاستروتوپیک
۲۰۸	۳-۸ تفاوت واکنش‌پذیری وجوه و هیدروژن‌های انانتیوتوپیک در واکنش آنزیمی
۲۱۱	۴-۸ انتخابگری غیرآنزیمی در افزایش به پیوندهای $C=C$, $C=O$
۲۱۴	۵-۸ کاربرد طیف‌سنجی NMR در شیمی فضایی
۲۱۴	۱-۵-۸ ثابت‌های کوپلاژ مجاور
۲۱۶	۲-۵-۸ برهمکنش‌ها و ترکیبات دیاسترومری: تشخیص انانتیومر
۲۲۰	۳-۵-۸ اثر اورهاوزر هسته
۲۲۴	مسائل حل شده
۲۲۹	خلاصه نکات کلیدی
۲۳۱	مسائل
۲۳۳	مراجع
۲۳۴	پاسخ به مسائل متن

پیشگفتار مترجمین

خداوند سبحان را شاکریم که توفیق عنایت فرمود تا بتوانیم ترجمه کتاب "شیمی فضایی" را به جامعه علمی کشور، اعضای محترم هیئت علمی دانشگاه‌ها و دانشجویان عزیز ارائه نماییم.

شیمی فضایی، در واقع، بررسی مفاهیم شیمی در فضای سه بعدی است. موضوع اصلی این کتاب، ارائه روش‌هایی برای درک زمینه‌های اساسی شیمی فضایی شامل بررسی شکل و خواص مولکول‌ها در سه بعد، مفاهیم صورت‌بندی، پیکربندی، کایرالیت، واکنش‌پذیری مواد و فضاگزین و فضاویژه بودن واکنش‌های شیمیایی است. برای دستیابی به این اهداف، هر یک از مباحث کتاب به طور سیستماتیک و به صورت ساده و روشن، با تفصیل کافی و ذکر مسائل مفید، مرتب شده است.

در ترجمه این کتاب سعی شده است تا حد امکان از واژه‌های فارسی مناسب استفاده شود تا هماهنگی لازم در کاربرد واژه‌ها بین همکاران دانشگاهی توسعه یابد. تلاش مترجمین، ارائه ترجمه‌ای روان و بدون نقص و اشکال بوده است، ضمن اینکه سعی شده است امانتداری کامل در این مورد صورت گیرد. با این وجود، بدیهی است که اثر حاضر خالی از اشکال نیست. لذا، انتقادهای و پیشنهادهای همکاران ارجمند و دانشجویان گرامی را در جهت ارتقاء کیفیت کتاب با تشکر فراوان ارج می‌نهم. امید است این ترجمه، مورد قبول و استفاده جامعه علمی کشور قرار گیرد.

در خاتمه بر خود لازم می‌دانیم از همکار محترم جناب آقای دکتر هوشنگ واحدی به خاطر ویراستاری، بازبینی و تطابق با متن اصلی کتاب تشکر و سپاسگزاری نماییم. همچنین از جناب آقای دکتر عبدالمحمد عطاران، مدیر محترم گروه شیمی، و از کلیه همکاران در معاونت‌های محترم دانشگاه پیام نور، مدیریت تهیه، تولید مواد و تجهیزات درسی و انتشارات دانشگاه پیام نور که ما را در مراحل مختلف تصویب و چاپ این کتاب یاری کرده‌اند صمیمانه قدردانی می‌نماییم.

دکتر محمد صادقی

دکتر حسین حسین‌زاده

پیشگفتار مؤلف

شیمی فضایی که اولین بار توسط آقای وانت هوف و لی بل معرفی شد، امروزه در شیمی آلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فهم شیمی فضایی به منظور تعاریف و قراردادهای مناسب مورد استفاده و همچنین آنچه که طی یک واکنش در سطح مولکولی اتفاق می‌افتد، ضروری می‌باشد. امید است که این کتاب خودآموز، وسیله مناسبی به منظور آشنایی دانشجویان کارشناسی (و شاید مقاطع بالاتر) با شیمی فضایی باشد. حجم کتاب محدود است که این مسأله سبب سهولت در گزینش موضوعات خاص مورد نظر می‌شود.

بدین وسیله تشکر ویژه‌ای از اساتید ارجمندم پروفسور Alwyn G. Davies FRS و Martyn Berry به خاطر خواندن متن کتاب و راهنمایی‌ها و پیشنهادات ارزنده‌شان به عمل می‌آورم. همچنین از پروفسور David Rycroft, Sean Higgins, Keiji Gamoh و Susan Armstrong برای خواندن و ویرایش متن کتاب تشکر می‌کنم. همین‌طور از پروفسور Zvi Rappoport و David Procter به خاطر راهنمایی‌های سودمندشان قدردانی می‌نمایم. سپاسگزاری ویژه‌ای هم از دکتر Colin Drayton برای ویرایش متن کتاب و خانم Janet Freshwater، عضو انجمن Royal Society of Chemistry، به خاطر نظارت بر مراحل اجرایی چاپ کتاب تشکر و قدردانی می‌کنم. تمام سعی و تلاشم ارائه کتابی بدون نقص بوده است. با این وجود مسئولیت اشکالات احتمالی موجود در کتاب را به عهده می‌گیرم.

واژه‌نامه‌ای از اصطلاحات مفید شیمی فضایی و ضمیمه‌ای مربوط به فصل ۷، در وب سایت <http://www.wiely.com> موجود می‌باشد. لیست کاملتری از این موارد که از آیوپاک به‌دست آمده است، بر روی آدرس وب سایت دکتر G.P. Moss (g.p.moss@qmw.ac.uk) قابل دسترسی است.

در پایان، از همسرم Brenda به خاطر مساعدت‌های بی دریغش در طی مراحل تهیه این کتاب که ماه‌ها از عمر خود را وقف علم شیمی فضایی نمود، صمیمانه تشکر می‌کنم.

دیوید جی. موریس

گلاسگو

فصل ۱

مولکول‌های ساده: هیبریداسیون، صورتبندی و پیکربندی

اهداف

در انتهای این فصل باید با مفاهیم زیر آشنا شده باشید:

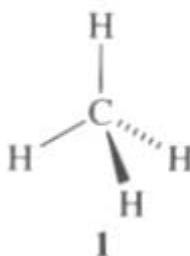
۱. نمایش مولکول‌های سه بعدی در دو بعد
۲. هیبریداسیون کربن در آلکان‌ها، آلکن‌ها و آلکین‌ها
۳. نمودار انرژی صورتبندی‌های مختلف اتان بر حسب میزان چرخش پیوند کربن-کربن حول محور خود
۴. صورتبندی‌های پوشیده، ناپوشیده، گوی، سیس و ترانس؛ برای مثال در پروپان و بوتان
۵. صورتبندی‌های صندلی و قایق و وارونگی حلقه در سیکلوهگزان
۶. برهمکنش استخلاف‌های واقع در موقعیت‌های محوری ۱ و ۳ (۱۳- دو محوری) در سیکلوهگزان استخلاف شده

۱-۱ مقدمه

شیمی مانند هر پدیده روزمره زندگی در فضای سه بعدی رخ می‌دهد. شیمی فضایی، مفاهیم فضایی شیمی را مطرح می‌کند و می‌تواند در دو زمینه مورد بررسی قرار گیرد.

قسمت نخست با شکل و خواص مولکول‌ها در سه بعد سروکار دارد و شامل اطلاعاتی راجع به مفاهیم صورتبندی، پیکربندی و کایرالیت می‌باشد که در فصل اول بررسی می‌شود. قسمت دوم با واکنش‌پذیری مواد سروکار دارد و فضا‌گزین یا فضا‌ویژه بودن، نزدیک شدن واکنشگرها به یکدیگر و تأثیرات آن در ماهیت محصولات نهایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. با توجه به واکنش‌پذیری مواد می‌توان گفت که به استثنای واکنشگرهای کروی مثل H^+ و Cl^- ، تقریباً همیشه یک جهت مناسب‌تر با اولویت بیشتر برای نزدیک شدن مولکول‌ها یا یونها به یکدیگر وجود دارد.

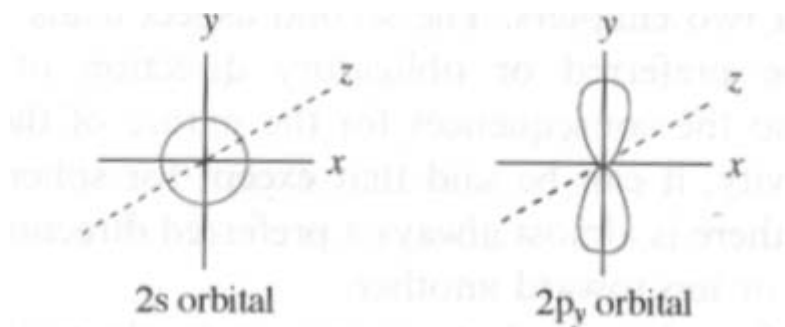
در ابتدا ساده‌ترین مولکول آلی یعنی متان، CH_4 را بررسی می‌کنیم، به خصوص ساختار و طریقه نمایش آن در دو بعد و تشکیل آن از اتم‌های سازنده‌اش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در متان، هر چهار پیوند کربن-هیدروژن یکسان هستند و به سمت گوشه‌های یک چهاروجهی منتظم با مرکزیت کربن جهت‌گیری کرده‌اند. همه زاویه‌های HCH برابر $109/28$ درجه می‌باشند که این زاویه‌ها تنها در مولکول‌هایی با تقارن چهاروجهی یافت می‌شود. نمایش معمول متان به صورت ساختار ۱ می‌باشد و قراردادی که عموماً برای نشان دادن این ساختار سه بعدی در دو بعد به‌کار گرفته می‌شود به این صورت است: همان‌طور که در ۱ نشان داده شده است، کربن مرکزی به همراه دو هیدروژن در صفحه کاغذ قرار می‌گیرد که این دو اغلب هیدروژن بالایی و هیدروژن سمت چپ هستند. پیوند بین کربن با این دو هیدروژن به‌صورت خطوطی با ضخامت معمولی نشان داده می‌شود. گوه ضخیم، پیوند بین کربن و هیدروژنی را نشان می‌دهد که بالای صفحه قرار دارد و خط‌چین نشان‌دهنده پیوند بین کربن و هیدروژن در پشت صفحه است.



توجه کنید که همواره سه اتم باید در صفحه قرار گیرند. در جهان پیرامون نیز همیشه می‌توان از سه نقطه یک صفحه گذر داد. به عنوان مثال، یک سه پایه هرگز نمی‌افتد. سه اتمی که در مولکول ۱ در یک صفحه قرار گرفته‌اند به صورت قراردادی انتخاب شده‌اند.

۱-۲ هیبریداسیون: متان

زمانی که یک پیوند بین H و C تشکیل می‌شود، توزیع الکترونی در اربیتال‌ها دچار اغتشاش می‌شود و دو اربیتال اتمی که هر کدام دارای یک الکترون هستند به اصطلاح گفته می‌شود که با یکدیگر همپوشانی می‌کنند. در مورد مولکول‌های ساده مانند متان یک سؤال پیش می‌آید: چگونه می‌توان چهار پیوند هم ارز C-H را در متان با آرایش الکترونی $2s^2 2p^2$ در لایه خارجی اتم کربن تطبیق داد؟ هیدروژن، تک الکترون خود در اربیتال $1s$ را شرکت می‌دهد در حالی که کربن، چهار اربیتال اتمی با انرژی مناسب برای پیوند دارد. این چهار اربیتال یک اربیتال $2s$ است و سه اربیتال $2p$ ، که به صورت $2p_x, 2p_y, 2p_z$ (برحسب جهت‌های فضایی مختلف آنها در فضا) نشان داده می‌شوند. x, y, z به جهت‌های سیستم مختصات کارتزین اشاره دارد. یک اربیتال $2s$ و یک اربیتال $2p$ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

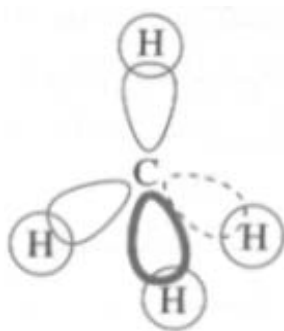


شکل ۱-۱

اربیتال 2s تقارن کروی دارد و بیشترین دانسیته الکترونی آن بر روی هسته است. اربیتال‌های 2p تقارن استوانه‌ای دارند و برعکس 2s، دانسیته الکترونی آنها بر روی هسته صفر است. اگر از یک اربیتال 2s و سه اربیتال 2p بدون انجام اصلاحات برای ایجاد پیوند استفاده شوند، در آن صورت چهار پیوند هم ارز در متان نخواهیم یافت. یک آرایش الکترونی با کمی انرژی بالاتر بصورت $1s^1 2s^1 2p^3$ می‌باشد و از اربیتال 2s و سه اربیتال 2p چهار اربیتال مخلوط شده هم ارز یا اربیتال‌های «هیبرید» به دست می‌آید.

در مورد کربن در متان و کربن‌های اشباع در اکثر مولکول‌های دیگر، هیبریداسیون به صورت sp^3 توصیف می‌شود. این اربیتال‌ها برخی از خصوصیات اربیتال‌های اتمی سازنده خود را دارا می‌باشند. به این صورت که یک اربیتال sp^3 دانسیته بار اندکی روی هسته همانند 2s دارد (ولی 2p ندارد) همچنین مانند اربیتال‌های p در فضا جهت‌دار است ولی با اندازه لب‌های نابرابر.

ساختار متان که اربیتال‌های هیبریدی sp^3 را در پیوند با چهار اتم هیدروژن نشان می‌دهد در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. زاویه مشاهده شده برای پیوند HCH به گونه‌ای است که اتم‌های هیدروژن در بیشترین فاصله از یکدیگر قرار گیرند. در مورد CF_4 هم، همین زوایا مشاهده می‌شوند ولی به طور کلی زوایای پیوندی C-C-C در مولکول‌های اشباع خطی اندکی بزرگتر است. به عنوان مثال، در مورد پروپان این زاویه تقریباً 112° است.



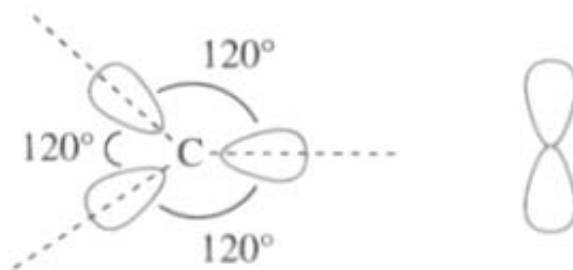
شکل ۱-۲

۳-۱ هیبریداسیون: اتن و آلکن‌ها

تجزیه و تحلیل ساختار متان، ما را به شناخت ساختار اتن، C_2H_4 ، که دو کربن معادل دارد، رهنمون نمی‌سازد. بر اساس داده‌های تکنیک پخش الکترونی^۱ (مرجع ۱) معلوم شده است که اتن یک مولکول مسطح است که همه شش اتم آن در یک صفحه قرار دارند و زوایای پیوندی 120° می‌باشد. پیوند در اتن را می‌توان با استفاده از اربیتال‌های مشابه قبل توجیه کرد: یعنی یک اربیتال $2s$ و سه اربیتال $2p_x, 2p_y, 2p_z$. ولی تفاوتی که در اینجا وجود دارد این است که یکی از اربیتال‌های $2p$ در هیبریداسیون شرکت نمی‌کند. نتیجه نهایی این است که به ازای هر اتم کربن سه اربیتال هیبریدی sp^2 و یک اربیتال p داریم. چند تفاوت مهم بین پیوند در اتن در مقایسه با پیوند در متان وجود دارد. درصد خصلت (s) در اربیتال‌های هیبریدی sp^2 در اتن و سایر آلکن‌ها بیشتر است و در نتیجه الکترون‌ها به هسته کربن نزدیک‌ترند. به علاوه، تغییر هیبریداسیون باعث تغییر زاویه پیوند می‌شود. در اتن و سایر آلکن‌ها، زوایای پیوندی (در اطراف کربن‌های sp^2) 120° هستند که همین باعث ایجاد ساختار مسطح می‌شود. این ساختار فضایی باعث می‌شود که استخلاف‌های کربن‌های آلکنی در بیشترین فاصله ممکن از یکدیگر قرار گیرند. خصوصیتی که در مورد متان هم صادق است (قسمت ۱-۲). در نتیجه، برای مثال در سیکلوهگزان، چهار کربن از شش کربن (و دو هیدروژن) در یک صفحه قرار دارند.

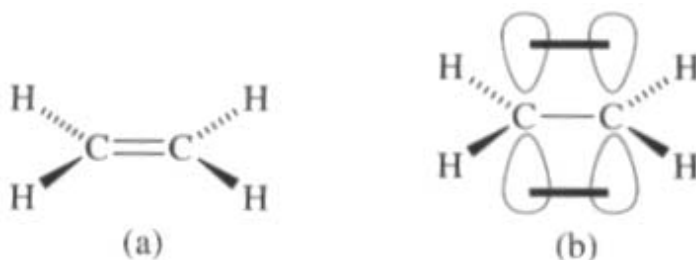
اما اربیتال‌های p که در تشکیل اربیتال‌های هیبریدی sp^2 شرکت نمی‌کنند چه می‌شوند؟ آن‌ها به صورت اربیتال‌های p باقی می‌مانند، هر کدام بر روی یک کربن و هر یک حاوی یک الکترون می‌باشند. آن دو با یکدیگر یک پیوند، که پیوند π (پای) نامیده می‌شود، بین اتم‌های کربن تشکیل می‌دهند. حالت همپوشانی در این مورد پهلوی به پهلوی می‌باشد. این حالت برعکس همپوشانی سر به سر است که باعث به وجود آمدن

پیوندهای σ (سیگما) می‌شود که در متن حاضر، پیوندهای C-H در متان (شکل ۲-۱) و اتن و نیز دیگر پیوند بین کربن و کربن در اتن را شامل می‌شود.



شکل ۳-۱

اربیتال‌های هیبریدی sp^2 در اتن و یک اربیتال p در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. اربیتال‌های هیبریدی sp^2 یک پیوند سیگمای کربن-کربن و دو پیوند سیگمای کربن-هیدروژن تشکیل می‌دهند. اتن را می‌توان به صورت شکل a-۴-۱ رسم کرد. اتن در شکل b-۴-۱، به گونه‌ای رسم شده است که همپوشانی اربیتال‌های p که باعث ایجاد پیوند π هستند، به وضوح دیده شود.



شکل ۴-۱

حضور پیوند π خواصی به یک آلکن می‌بخشد که آن را از یک آلکان متمایز می‌سازد. پیوند π ، به خاطر طبیعت پهلویه‌پهلوی بودن همپوشانی اربیتال‌های p سازنده

آن، ضعیف‌تر از یک پیوند σ است. به‌علاوه، الکترون‌های پیوند π همان‌طور که به صورت نسبی نشان داده شده است، در بالا و پایین صفحه مولکول آلکن قرار دارند. این الکترون‌ها، منشأ واکنش‌پذیری آلکن‌ها در برابر الکترون دوست‌ها هستند، مانند افزایش الکترون دوستی برم (فصل ۴).

پیوند π در اتن (و سایر آلکن‌ها) به اندازه کافی قدرت دارد تا از چرخش حول پیوند سیگمای کربن-کربن جلوگیری کند و این یک خصوصیت مهم در پیوند کربن-کربن در اتن است (قسمت ۱-۶). پیوند بین کربن‌های sp^2 در آلکن شامل یک پیوند σ و یک پیوند π است که مجموعاً به عنوان یک پیوند دوگانه در نظر گرفته می‌شود.

پیوندهای دوگانه بین کربن و نیتروژن نیز تشکیل می‌شود و ایمین‌ها ($R_2C=NR$) را به دست می‌دهد. همچنین پیوند دوگانه بین کربن و اکسیژن، آلدهیدها و کتون‌ها را می‌سازد. در این دو مورد، هم یک پیوند σ و یک پیوند π وجود دارد. در ایمین‌ها، آلدهیدها و کتون‌ها، نیتروژن و به خصوص اکسیژن، الکترونگاتیوتر از کربن هستند. بنابراین الکترون‌های پیوند π ، به ترتیب به سمت نیتروژن و اکسیژن کشیده می‌شوند. این موضوع، باعث می‌شود که اکسیژن و نیتروژن به صورت جزیی بار منفی و کربن‌های این پیوندهای دوگانه به مقدار جزیی بار مثبت پیدا کنند.

۴-۱ هیبریداسیون: اتین

برای تکمیل بحث، به اختصار پیوند سه گانه را در اتین (استیلن $HC \equiv CH$)، بررسی می‌کنیم، هر چند که از نظر شیمی فضایی اهمیت کمی دارد. کربن‌های اتین یک اربیتال s و یک اربیتال p را به کار می‌برند تا دو اربیتال هیبریدی sp را ایجاد کنند. بدین ترتیب دو اربیتال هیبرید نشده p باقی می‌مانند. اربیتال‌های هیبریدی sp برای تشکیل پیوندهای σ مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی برای پیوند با کربن دیگر و یکی برای پیوند با هیدروژن. اربیتال‌های p روی هر کربن دو پیوند π جدا و مستقل