

# ریاضیات آروماتیسیتی

کریستوفر گلایدول و داگلاس لوید

در نتیجه برهم کنش دو یا چند حلقه مزدوج با یکدیگر، یک سیستم هوکل با پایداری بیشتر تشکیل شود و یا در نتیجه برهم کنش دانه‌ای، خصوصیات مربوطه در سیستمهای کوچک مجزای  $\pi$  که توسط پیوندهای بلند و ضعیف متصل گردیده‌اند حفظ شود.

تخمینهای مربوط به انرژی رزونانسی که برای هوالکترون  $\pi$  به عنوان یک ضریب آروماتیسیتی بر اساس مقایسه ترکیبات مورد سؤال با ساختارهای مرجع مشخص استفاده می‌شوند نشان داده‌اند که برای آنولنهای مسطح  $C_nH_n$  سیستمهایی که دارای  $n = 4p$  باشند ناپایدار شده و آنهایی که دارای  $n = 4p + 2$  هستند پایدار می‌گردند ولی مقدار پایداری و یا ناپایداری به سرعت با افزایش مقدار  $n$  کاهش می‌یابد. از چنین روشهایی انتقادهای زیادی شده است به خصوص اگر بر پایه روشهای ابتدایی برای محاسبه انرژیها بنا شده باشند، به علاوه اغلب فرضیات غیرمدلل در باره شکل، آنولنها و ساختارهای مرجع صورت گرفته است. مع‌هذا، نتایج با شواهد کیفی تجربی در پیدانمودن اثر ناپایداری اصلی در سیستم  $4\pi$  و اثر ناپایداری کمتری در سیستم مسطح  $8\pi$  مطابقت دارد، درحالی که اثرهای پایدارکننده در سیستمهای مسطح  $6\pi$  و  $10\pi$  وجود دارند. وقتی که  $n \geq 12$  باشد، اثر بر روی پایداری الکترونیهای  $\pi$  ناچیز می‌شود.

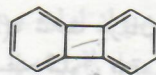
در بحث حاضر، اساس نتیجه‌گیریهای خود را بر تلفیقی از داده‌های ساختاری تجربی و درجات محاسبه شده پیوندها از طریق بهینه‌سازی ساختاری با کیفیت بالا که با استفاده از روشهای نیمه تجربی SCF-MO انجام شده‌اند استوار می‌کنیم. نتایج ما اغلب توضیح ساختارهای الکترونی را بر اساس ساختارهایی با پیوند یگانه ممکن می‌سازد؛ نتایج ما در مورد برهم کنش گروههای کوچک الکترونی  $\pi$  برای تشکیل حلقه‌های بزرگتر در جدول زیر خلاصه شده است.

## سیستمهای دو حلقه‌ای

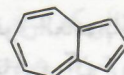
وقتی سیستمهای دو حلقه‌ای شامل دو حلقه جوش خورده باشند که دارای یک پیوند C-C مشترک در دو حلقه است، بسته به اینکه آیا هر دو حلقه دارای تعداد اتمهای زوج هستند یا خیر دو نوع امکان وجود دارد. وقتی هر دو حلقه شامل تعداد اتمهای زوج باشند، امکان ترسیم ساختاری شامل پیوندهای متناوب یگانه و دوگانه وجود دارد، به طریقی که پیوند مشترک در دو حلقه ممکن است

قاعده  $(4n+2)$  هوکل در مورد الکترونیهای  $\pi$  ترکیبات آروماتیک مدتهاست که به صورت یک سنگ بنای نظریه شیمی آلی در آمده است. به طور کلی، سیستمهای مزدوج حلقه‌ای با  $(4n+2)$  الکترون به عنوان ترکیباتی در نظر گرفته می‌شوند که دارای مقداری پایداری الکترونی ذاتی، به نام آروماتیسیتی هستند، در حالی که آنهایی که دارای  $4n$  الکترون هستند به عنوان ترکیبات ناپایدار و بنابراین ضد آروماتیک محسوب شده‌اند. با استفاده از روشهای اوربیتال مولکولی، روشهای VB و نظریه گراف شیمیایی اندازه گیری کمی پایداری و یا ناپایداری یک سیستم حلقه‌ای در مقایسه با سیستم مناسب غیر حلقه‌ای مرجع انجام گرفته است.

در اشتقاق اولیه قاعده  $(4n+2)$  چندین تقریب مهم صورت گرفته است. نه تنها سیستم مزدوج را کاملاً مسطح با پیوندهای مساوی C-C در طول سیستم فرض کردند، بلکه مزدوج بودن در یک مدار بسته را نیز لازم دانستند. گرچه قاعده  $(4n+2)$  هوکل به طور جدی برای هیدروکربنهای چند حلقه‌ای متر اکم شده استفاده نمی‌شود، اما سیستمهای زیادی از این نوع وجود دارند که در بعضی از آنها، دست کم، شکلهای رزونانسی، نشان‌دهنده حلقه‌های مزدوجی است که چرخش الکترونها در بیش از یک حلقه صورت می‌گیرد. آزلون (۱) و بی‌فیلن (۲) مثالهای ساده‌ای می‌توانند باشند، در چنین شکلهای رزونانسی، پیوندهای عرضی تنها از نوع سیگما هستند.



(۲)



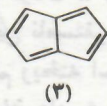
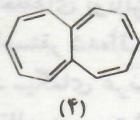
(۱)

در این مقاله به بررسی جنبه‌ای از چنین سیستمهای مزدوج می‌پردازیم که تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، یعنی میزان تمایل کل جمعیت الکترون  $\pi$  برای تشکیل گروههای کوچک  $(4n+2)$  و خودداری از تشکیل گروههای  $4n$  در هیدروکربنهای چند حلقه‌ای.

ما می‌توانیم بر اساس محاسبات نیمه تجربی SCF-MO\* و همچنین اغلب بر اساس ساختارهای مولکولی، شرایطی را مشخص کنیم که

\* SCF-MO مخفف Self Consistent Field - Molecular Orbital به معنی میدان قائم به ذات - اوربیتال مولکولی می‌باشد. - م.

اختلاف کم انرژی بین شکل‌های مستقر و نامستقر را به هم بریزند. در هم‌رده‌های پنتالن (۳) و هپتالن (۴) تقریباً تثبیت پیوند به طور کامل وجود دارد.

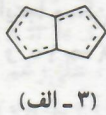
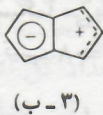
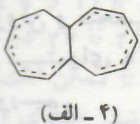


برای آزون، به صورتی شبیه به بی‌فنیلن (۲) ساختارهای دیگری با سیستم مجزای  $4\pi$  و  $6\pi$  می‌توان مشخص کرد. بهترین ساختار نشان‌دهنده آن به صورت دوسیستم  $6\pi$  الکترونی است و با دو پیوند که مرتبه آنها خیلی کم است متصل شده‌اند، (۱-الف) و (۱-ب).

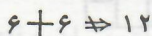


در حقیقت، یک سیستم  $10\pi$  الکترونی نامستقر ترجیح داده می‌شود، بنابراین می‌توانیم بنویسیم  $10 \Rightarrow 4+6$  و نتیجه را این طور بیان کنیم که اجزای  $4\pi$  و  $6\pi$  با یکدیگر برهم کنش داده و حالت  $10\pi$  را تشکیل می‌دهند.

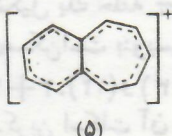
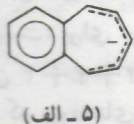
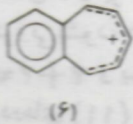
برای پنتالن (۳)، پایداری نه از راه به کار بردن دوسیستم نامستقر  $4\pi$  الکترونی مانند (۳-الف) به دست می‌آید و نه از راه‌های سیستم  $2\pi$  و  $6\pi$  الکترونی مانند (۳-ب) و داشتن یک ساختار نامستقر محیطی  $8\pi$  الکترونی؛ ترکیب یک تترا آلکن است (۳).



هپتالن می‌تواند یک ساختار  $12\pi$  (۶+۶) الکترونی، مانند ۴-الف به خود بگیرد، ولی هر پایداری که از نامستقر شدن به دست آید توسط عوامل فضایی نامناسب کاهش می‌یابد. به هر حال هیچ پایداری در نتیجه مخلوط شدن چنین سیستم‌هایی برای ایجاد سیستم ناهم‌مستقر  $12\pi$  الکترونی به دست نمی‌آید. بنابراین می‌نویسیم



کاتیون (۵)، که با آزون ایزوالکترونیک است می‌تواند به صورت (۵-الف) نیز نمایش داده شود. در این حالت نامستقر شدن محیطی  $10\pi$  الکترونی نشان داده شده است یعنی  $10 \Rightarrow 4+6$ . اما آنیون (۶) که با هپتالن ایزوالکترونیک است دارای ۲ سیستم  $6\pi$  است که توسط پیوندهای بلند و ضعیف از هم جدا شده و ذاتاً همدیگر را دفع می‌کنند. بنابراین  $12 \Rightarrow 6+6$  است.



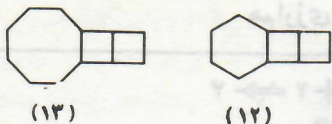
هم ارزی	مثال
$2+2 \Rightarrow 4$	۷
$2+2 \Rightarrow 6$	۸
$2+6 \Rightarrow 8$	۹
$2+8 \Rightarrow 10$	۱۰
$4+4 \Rightarrow 8$	۳
$4+4 \Rightarrow 2+4+2$	۱۱
$4+6 \Rightarrow 10$	۱ و ۵
$4+6 \Rightarrow 10$	۱۲
$4+8 \Rightarrow 12$	۱۳
$6+6 \Rightarrow 12$	۲، ۴، ۶، ۱۳، ۱۴، ۱۵
$6+8 \Rightarrow 14$	۱۶
$2+2+2 \Rightarrow 8$	۳
$2+6+2 \Rightarrow 10$	۱۸
$2+2+2 \Rightarrow 12$	۱۷
$4+6+4 \Rightarrow 14$	۱۹
$6+2+6 \Rightarrow 14$	۲۰
$6+6+2 \Rightarrow 16$	۲۳
$6+6+6 \Rightarrow 18$	۲۴
$6+2+2+2 \Rightarrow 12$	۲۱
$6+2+2+2 \Rightarrow 14$	۲۲

\* جدول، مقادیر پایداری حلقه‌های  $2\pi$  و  $6\pi$  و به مقدار کمتری، پایداری  $10\pi$  و ناپایداری حلقه‌های  $4\pi$  و  $8\pi$  را، بدون در نظر گرفتن تعداد کل الکترون‌های  $\pi$ ، نشان می‌دهد.

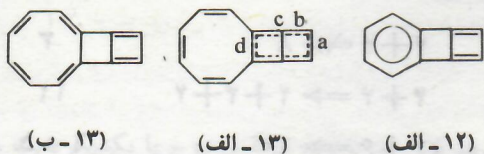
یگانه یا دوگانه باشد، مثل نفتالین یا بی‌فنیلن (۲). برای ترکیبات با تعداد اتم‌های فرد در حلقه، برای مثال، آزون (۱) امکان ترسیم ساختارهایی با پیوندهای متناوب یگانه و دوگانه نیست مگر اینکه پیوند مشترک در دو حلقه یگانه باشد.

در آزون (۱) نامستقر شدن الکترونها به طور وسیعی وجود دارد و محاسبات مکانیک کوانتومی محض (abinitio) شامل همبستگی الکترون، تقارن  $C_{2v}$  را برای ساختار آزون پیدا می‌کند که دارای نامستقر شدن محیطی پیوندهاست. داده‌های پرتو X بر روی آزون بدون نتیجه هستند؛ هم به خاطر بی‌نظمی در ساختار خود آزون و هم به علت امکان اینکه نیروهای بلور می‌توانند

نوع سیگما است و به ترتیب دارای ۱۰ و ۱۲ الکترون می باشند.



مرتب‌های پیوندی محاسبه شده، نشان می دهند که ساختارها بایستی به ترتیب به صورت (۱۲-الف) و (۱۳-الف) نشان داده شوند.



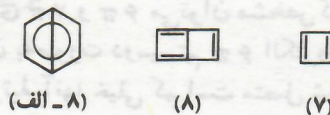
در (۱۲) هیچ برهم کنشی بین سیستم ۳ و ۶ حلقه بزرگ و جزء سیکلو بوتادی ان نیست. در مولکول احتیاج به این است که حداقل یک حلقه سیکلو بوتادی انوئید وجود داشته باشد. شکل (۱۲-الف) تعداد چنین برهم کنشهایی را به حداقل می رساند؛ هر سیستم ۱۰ و محیطی، بایستی شامل یک چنین حلقه ای باشد و پایداری بیشتر نسبی سیستم ۳ است که ساختار الکترونی را مشخص می سازد. بنابراین در مقایسه با کاتیون (۵)، در مورد (۱۲)، می توان نوشت  $۱۰ \gg ۴ + ۶$ . چنین تضادی بین مثالهای ذکر شده، بایستی از عوامل دیگر سرچشمه گیرد. ممکن است تا اندازه ای به این موضوع مربوط باشد که با نامستقر نمودن تمام ۱۰ الکترون در (۵)، بار نیز تا آنجا که ممکن است نامستقر می شود، در حالی که، در مورد (۱۲)، هیچ پخش باری وجود ندارد که باعث نامستقر شدن گردد. به علاوه در مورد (۵)، هیچ اشکالی در نتیجه توسعه خصوصیات سیکلو بوتادی انوئید در آن ایجاد نمی شود.

در (۱۳)، مقدار نامستقر شدن ناچیزی در سیستم ۱۲ محیطی وجود دارد، ساختار الکترونی دوباره تعداد حلقه های سیکلو بوتادی انوئید را به حداقل می رساند ولی، اگر چه تثبیت بسیار قوی پیوند در حلقه هشت عضوی وجود دارد، مقداری نامستقر شدن در پیوندهای موجود در سیستم ۳ مشاهده می شود (a-d)؛ این جزء تا حدی شبیه به بوتالن (۸) است. در (۱۳)، دوباره  $۱۲ \gg ۴ + ۶$  می باشد و حالت دیگر (۱۳-ب)  $۴ + ۸$  نخواهد بود.

هم در (۱۰) و هم در (۱۳)، حلقه دار کردن یک حلقه چهار عضوی سیر نشده کافی است که مسطح شدن حلقه هشت عضوی را باعث شود. محاسبات \*MINDO/3 نشان داده است که حلقه دار کردن حلقه های سه عضوی یا چهار عضوی سیر شده نیز برای مسطح کردن اسکلت سیکلواکتاترا ان کافی هستند.

\* MINDO/3 مخفف Modified Incomplete Neglect of Differential Overlaps/Version 3 به معنی چشمپوشی ناکامل از همپوشانیهای دفرانسیلی/اصلاح سوم. شرح این اصلاح در چند مقاله بی دربی در سال ۱۹۷۷ توسط داور (M. J. S. Dewar) و همکارانش در J. Amer. Chem. Soc. منتشر شده است. -م.

در سیکلو بوتادی ان (۷) به نظر می رسد که دو جزء ۲ و ۳ پیوندهای بلند ضعیف از یکدیگر جدا شده اند که در آن هیچ نامستقر شدنی صورت نمی گیرد و ممکن است بنویسیم  $۴ \gg ۲ + ۲$ . در سیستم دو حلقه ای بوتالن (۸)، ۶ الکترون ۳ وجود دارند که مانند بنزن نامستقر شده اند، گرچه این نامستقر شدن مقداری توسط پیوند سیگمای عرضی حلقه به هم ریخته است به طوری که بهتر است بوتالن به صورت (۸-الف) نشان داده شود. در این مورد می توان نوشت  $۶ \Rightarrow ۲ + ۴$ .



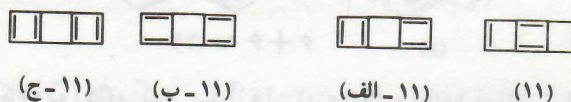
با ادامه مجموعه دو حلقه ایها از بوتالن به ترکیبات ۹ و ۱۰ می رسیم.



تنها مشتقات پر استخلاف ۹ توصیف شده اند؛ گرچه مقدار قابل توجهی تثبیت پیوند وجود دارد، اجزای ۲ و ۳ توسط پیوندهای بلند ضعیف از یکدیگر جدا شده اند. در (۱۰) یک سیستم ۱۰ با نامستقر شدن ضعیف الکترونی وجود دارد و ساختار یک مشتق دی فنیل آن که توسط پرتو X بررسی شده است، نشان می دهد این نامستقر شدن برای صفحه ای نمودن تمام اسکلت مولکول کافی است (سیکلو اکتا تتران (۱۵) را بادی آنیون آن (۱۶) مقایسه کنید). پیوند پل شده بسیار بلند است، برای مثال بلندتر از پیوند پل شده در آزلون و منحصر آ از نوع سیگما می باشد. در اینجا ممکن است برای سیستمهای ۹ و ۱۰ به ترتیب  $۸ \Rightarrow ۲ + ۶$  و  $۱۰ \Rightarrow ۲ + ۸$  را بنویسیم.

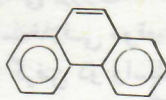
### سیستمهای سه حلقه ای

مجموعه ترکیبات حلقه ای چهار تایی که با سیکلو بوتادی ان (۷) و بوتالن (۸) شروع می شود با سیستم سه حلقه ای (۱۱) ادامه می یابد.



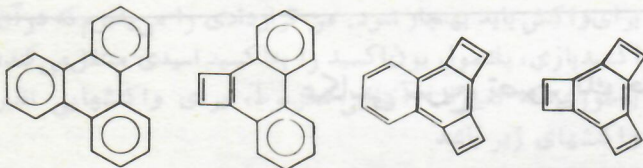
چنین نمایی از این ترکیب منحصر آ با مرتبه های پیوندی محاسبه شده مطابقت دارد و تعداد حلقه های از نوع سیکلو بوتادی ان موجود را به حداقل می رساند؛ ایزومرهای والانس (۱۱-الف)، (۱۱-ب) هر دو شامل چنین حلقه هایی هستند و (۱۱-ج) شامل سه تا می باشد. شواهدی دال بر نامستقر شدن که منجر به تشکیل یک حلقه ۸ الکترونی بشود، در دست نیست، برای این مثال ممکن است بنویسیم  $۸ \gg ۴ + ۴$  یا همچنین  $۲ + ۴ + ۲ \Rightarrow ۲ + ۴$ . (۱۲) و (۱۳) هم رده های (۱۱) می باشند که پیوندهای کربن-کربن اسکلت آن از

استقرار قابل ملاحظه ای در فناترن (۲۰) وجود دارد که در آن دو سیستم  $6\pi$  به طور مؤثر شرکت دارند؛  $14 \Rightarrow 6+2+6$ .



(۲۰)

فنا ترن اولین نمونه از مجموعه دوچنگاله بنزنوئید است. در سیستمهای دوچنگاله که شامل مخلوطی از حلقه‌های چهارعضوی و شش عضوی باشند چندین قاعده عمومی تبعیت می‌شود: (۱) تعداد مدارهای بسته  $6\pi$  حداکثر مقدار می‌باشد و مدارهای  $4\pi$  حداقل تعداد را داراست؛ (۲) در جایی که این احتیاجها به طور شدیدی متضاد باشند، تثبیت پیوند به طور قابل ملاحظه‌ای وجود خواهد داشت؛ (۳) مدارهای بسته نامستقر بزرگتر از  $6\pi$  الکترون از اهمیت ناچیزی برخوردارند. این عمومیت؛ در ترکیبات ۲۱ تا ۲۴ مشخص شده‌اند.



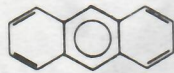
(۲۴)

(۲۳)

(۲۲)

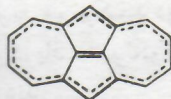
(۲۱)

در (۲۱) و (۲۲) هیچ مدار  $6\pi$  نامستقری وجود ندارد در حالی که در (۲۳) و (۲۴) به ترتیب دو و سه مدار  $6\pi$  موجود است؛ هیچ شواهدی از ساختارهای مولکولی و الکترونی  $12\pi$  و  $14\pi$  و  $16\pi$  یا  $18\pi$  محیطی محاسبه شده برای ۲۱ تا ۲۴ در دست نیست، علی‌رغم اینکه تعداد کل الکترونها  $6\pi$  ممکن است  $4\pi$  و یا  $(4\pi+2)$  باشند. وقتی تنها حلقه‌های شش عضوی وجود داشته باشند مانند فناترن (۲۰) و آنتراسن (۲۵) مثالهای ساده‌ای از این قواعد پیدا می‌شوند. مثالهای بسیار دیگری نیز وجود دارند.



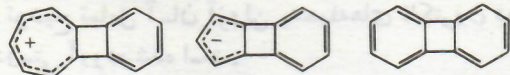
(۲۵)

برای هیدروکربنهای متراکم، قاعده  $(4n+2)$  هوکل معمولاً قابل استفاده نیست، زیرا ساختار الکترونی نمی‌تواند متشکل از مدارهای بسته ساده تصور شود. ولی بایستی توجه داشت که ترکیباتی از این نوع وجود دارند که در آنها یک مدار محیطی به طور مؤثری از یک سیستم داخلی  $6\pi$  مجزا شده است. بنابراین در (۲۶)، سیستم  $14\pi$  که به صورت نامستقر ضعیف محیطی است، یک جزء اتن مرکزی را احاطه کرده است.



(۲۶)

در بی‌فنیلان (۲) و هم‌رده‌های باردار آن (۱۴) و (۱۵)

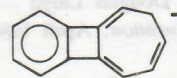


(۱۵)

(۱۴)

(۲)

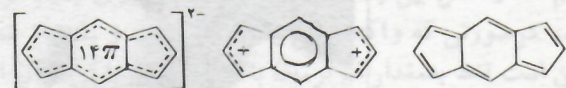
دو حلقه توسط یک پیوند طولانی با مرتبه پیوند کم متصل شده‌اند، بنابراین برای هر سیستم، دوباره  $12 \Rightarrow 6+6$  به دست خواهد آمد. این موضوع توسط شواهد تجربی ثابت شده است. در هم‌رده آنیونی (۱۵) که شامل کل  $14\pi$  الکترون است، دوباره هیچ نامستقر شدن در روی حلقه چهارعضوی (۱۶) وجود ندارد. در اینجا  $14 \Rightarrow 8+6$  است.



(۱۶)

اثر ناپایدار کنندگی هشت الکترون  $8\pi$  کم است و اثر پایدار کنندگی  $14\pi$  الکترون  $6\pi$  حداقل است، به طوری که عامل مؤثر بر روی ساختار الکترونی، وجود گروه  $6\pi$  حلقه شش عضوی است. نامستقر شدن الکترونها  $6\pi$  در حلقه هفت عضوی (۱۶) به وقوع نمی‌پیوندد، زیرا در این حالت باعث ایجاد سیستم  $8\pi$  الکترونی مستقر می‌شود.

در دی‌کاتیون  $10\pi$  الکترونی که از  $s$ -اینداسن (۱۷) مشتق می‌شود، مرتبه‌های پیوند نشان می‌دهد که ساختار (۱۸) شامل یک سیستم  $6\pi$  در حلقه مرکزی با دو جزء آلکیل  $2\pi$  است. این دو جزء توسط پیوندهایی با مرتبه کم به یکدیگر متصل‌اند؛ بنابراین  $10 \Rightarrow 2+6+2$  و هیچ نامستقر شدن محیطی وجود ندارد.



(۱۹)

(۱۸)

(۱۷)

ولی در دی‌آنیون (۱۹)، مرتبه‌های پیوند نشان دهنده یک سیستم نامستقر محیطی  $14\pi$  می‌باشد که دارای دو پیوند ضعیف عرضی حلقه‌ای است. در اینجا  $14 \Rightarrow 4+6+4$ . و شواهد تجربی برای این نوع ساختار الکترونی وجود دارد. در دی‌کاتیون، اثر پایدار کنندگی سیستم  $6\pi$  از اثر پایدار کنندگی ضعیف سیستم  $10\pi$  به مراتب بیشتر بوده ولی در دی‌آنیون اثر ناپایدار کنندگی شدید دو گروه  $4\pi$  شدیداً بر اثر پایدار کنندگی گروه  $6\pi$  پیشی گرفته است. این امر باعث ایجاد یک مدار  $14\pi$  با پایداری ضعیف می‌شود. همچنین پخش دو الکترون اضافی روی نقاط ممکن مختلف سیستم نیز می‌تواند مؤثر باشد.

سیستمهای دوچنگاله و متراکم

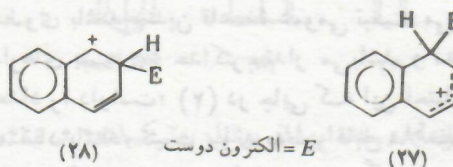
در مقایسه با سیستم نامستقر  $14\pi$  در دی‌آنیون  $s$ -اینداسن،

تولید این سیستم ۲+۶ در (۲۷) فعالیت آسان نفتالن را در واکنشهای استخلافی الکترون دوستی توضیح می‌دهد. دلایل مشابهی برای توضیح تمایل آسان آزلون به حمله‌های الکترون دوستی و هسته دوستی آورده شده است.

به‌طور مشابه، حمله بر روی موقعیت ۹-آنتراسن یا فنانترن ایجاد دوسیستم بنزنوئید را در واسطه سبب می‌گردد؛ این واسطه از حمله بر موقعیتهای دیگر به‌دست نیامده است.

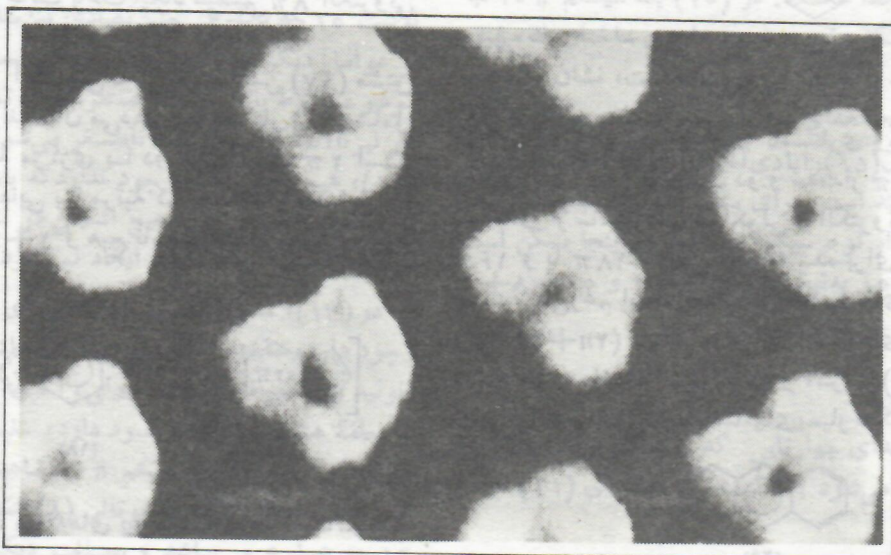
ترجمه ناصر ایرانپور

در نتیجه گیری، بایستی توجه داشت که در نظر گرفتن ریاضیات آروماتیسیتهی ممکن است در تعیین مسیر واکنش نیز تأثیر داشته باشد. استخلاف الکترون دوستی بر روی حلقه نفتالن که توسط سینتیک کنترل می‌شود محصول استخلافی موقعیت ۱- را بر موقعیت ۲- ترجیح می‌دهد. در نظر گرفتن دو واسطه (۲۷) و (۲۸) نشان می‌دهد که اولی می‌تواند به‌صورت سیستم ۲+۶ با حلقه پایدار- شده بنزن و کاتیون آللیک باشد، در حالی که دومی، با اینکه دارای سیستم بنزنوئید است، نمی‌تواند دارای سیستم آللیک کمک‌کننده باشد.



• The Arithmetic of Aromaticity  
Christopher Glidwell & Douglas Lloyd  
*Journal of Chemical Education*, April 1986

### عکاسی سریع، تصویر تک حلقه‌های بنزن را نشان می‌دهد



شکل مشخص حلقه شش عضوی بنزن به وضوح در تصویر مولکول آن که توسط میکروسکوپ تونل‌زنی پویسی (STM) \* به وسیله دانشمندان IBM گرفته شده است، مشاهده می‌شود. این تصویر به‌طور آشکار شبیه الگوی مولکولی فضا پر بنزن است که شیمی‌دانان ده‌ها سال آن را به‌کار گرفته‌اند. این فن که به سال ۱۹۸۱ در آزمایشگاههای پژوهشی IBM واقع در زوریخ اختراع شد، لوله سوزنی شکلی را به‌کار می‌گیرد که سطح نمونه را در فاصله حدود  $10 \text{ \AA}$  می‌پوید. با اعمال ولتاژ به لوله، جریانی بین لوله و نمونه عبور می‌کند. مقدار جریان که با فاصله بین دو سطح تغییر می‌کند، شناساگر حساسی برای تعیین فاصله بین آنها می‌باشد. دانشمندان در مرکز تحقیقاتی IBM در سن‌خوزه کالیفرنیا، روی آرایه منظمی از مولکولهای بنزن و کربن مونوکسید که تنگ هم روی سطح فلز رودیم متصل شده‌اند، مطالعه کردند (کربن مونوکسید در تصویر بالا مشاهده نمی‌شود). پژوهشگران در ابتدا سعی کردند بنزن را تنها به‌کار گیرند، ولی دریافتند مولکولهای بنزن تمایل به‌خزیدن روی سطح فلز رودیم را دارند. این امر باعث تیره شدن تصویر STM گردید.

ترجمه محمدرضا سعیدی

• C & EN News, August 1, 1988

\* STM مخفف Scanning tunneling microscope است. - م.