

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه کارشناسی ارشد

دانشکده شیمی

گروه شیمی فیزیک

بررسی اثرات استخلاف آلکیل بر خواص ساختاری و الکترونی الیگوتیوفن با
استفاده از روش‌های آغازین و نظریه تابعی چگالی

دانشجو:

منیره خرمی

استاد راهنما:

دکتر حسین نیکوفرد

استاد مشاور:

دکتر زهرا کلانتر

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۸۹

نقدیر و تشکر

خدای یکتا را سپاس‌گزارم که در دو سال اخیر، فرصت شاگردی در کلاس علم و ادب استادان فرهیخته‌ای را داشته‌ام. به ویژه از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر نیکوفرد تشکر می‌کنم که بی شک بدون وجود کمک و راهنمایی ایشان که در تمامی مراحل پایان‌نامه حامی و راهنمای صبور من بودند، اتمام پروژه امکان‌پذیر نبود. همچنین لازم می‌دانم از استاد مشاورم سرکار خانم دکتر کلانتر که پیشبرد این پایان‌نامه مدیون همکاری این عزیز بوده است، کمال تشکر را داشته باشم. از خداوند متعال برای کلیه کسانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند موفقیت و سربلندی همراه با آرامش در تمام مراحل زندگی خواستارم.

چکیده

امروزه پلیمرها با قابلیت‌های فراوان و کاربرد گسترده‌ای که دارند بسیاری از جنبه‌های زندگی ما را پوشش داده‌اند. یک دسته از این مواد، پلیمرهای رسانا هستند. در دهه‌های اخیر تحقیقات وسیعی در کشف قابلیت‌های جدید این پلیمرها، بهینه کردن خواص و کاربردهای نوین آن‌ها صورت گرفته است. در این پایان‌نامه به پلی‌تیوفن که یکی از پلیمرهای رساناست توجه شده و اثرات استخلاف آلکیل بر خواص ساختاری و الکترونی این پلیمر بررسی شده است. ما بررسی‌های خود را با استفاده از روش‌های آغازین و نظریه تابعی چگالی انجام داده‌ایم. ساختار کلیه مونومرها و الیگومرهای مورد مطالعه توسط مجموعه پایه $6-31G^{**}$ بهینه گردید. نتایج محاسبات روی مونومرها نشان داده است که با اتصال آلکیل به تیوفن، طول پیوندها تغییر می‌کند اما با افزایش طول استخلاف آلکیل تغییری در هندسه مولکول ایجاد نمی‌شود. همچنین در اثر استخلاف، تساوی بار در موقعیت‌های α و α' و همچنین β و β' حلقه مونومر از بین می‌رود و چگالی بار در موقعیت‌های نزدیک به استخلاف کاهش و در موقعیت‌های دورتر افزایش می‌یابد. بررسی شکاف انرژی در مونومرها نشان داده است که با اتصال گروه آلکیل به تیوفن، شکاف انرژی کوچک می‌شود و با افزایش طول استخلاف، این شکاف کوچک‌تر می‌شود اما برای آلکیل‌های بزرگ‌تر از پروپیل تغییر چندانی در شکاف انرژی به وجود نمی‌آید. لذا استخلاف‌های متیل، اتیل و پروپیل برای بررسی الیگومرها انتخاب شده‌اند. ما با مطالعاتی که روی ساختار الیگومرهای ۳- آلکیل تیوفن انجام داده‌ایم، پیکربندی $HT-HT$ را برای محاسبات الیگومرها انتخاب کردیم. محاسبات انجام گرفته روی الیگومرهای خنثی و رادیکال کاتیون نشان داد که الیگومرهای رادیکال کاتیون ویژگی‌های بسیار بهتری دارند. سیستم مزدوج در آن‌ها همگن است و پیچش ندارد که این لازمه رسانایی در یک پلیمر مزدوج است. همچنین مطالعات روی شکاف انرژی نشان داد که با افزایش طول زنجیر الیگومر، شکاف کوچک‌تر می‌شود. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با وجود اختلافاتی که در روند شکاف انرژی در الیگومرهای کوچک‌تر دیده می‌شود با بزرگ‌تر شدن طول زنجیر پلیمری و سیستم مزدوج، این تفاوت‌ها کمتر می‌شود و به نظر می‌رسد برای الیگومرهای

طویل‌تر، نوع استخلاف آلکیل اثر چندانی بر شکاف انرژی ندارد. همچنین مطالعات روی پتانسیل یونش الیگومرهای ۳- آلکیل تیوفن نشان از کاهش پتانسیل یونش با افزایش طول زنجیر دارد.

کلمات کلیدی: پلیمرهای رسانا، آلکیل تیوفن، اثرات استخلاف، روش‌های آغازین، نظریه تابعی چگالی، خواص الکترونی

مقالات مستخرج از پایان نامه

A theoretical investigation structure and electronic characteristics of the thiophene and 3-propyle thiophene oligomers

(سیزدهمین سمینار شیمی فیزیک ایران، دانشگاه شیراز و دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، فروردین ۸۹)

Ab initio and DFT study of alkyle substituent effects on the electronic and structural properties of thiophene derivatives

(سیزدهمین سمینار شیمی فیزیک ایران، دانشگاه شیراز و دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، فروردین ۸۹)

A theoretical investigation structure and electronic characteristics of 3- propyle thiophene oligomers

(همایش ملی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، اردیبهشت ۸۹)

DFT study of electronic properties of β - alkyl thiophene oligomers

(هفدهمین سمینار شیمی آلی ایران، دانشگاه مازندران، بابلسر، مهر ۸۹)

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ۱

فصل دوم : پلیمرهای رسانا

۱-۲- تعریف ۵

۲-۲- تاریخچه ۶

۳-۲- تقویت پلیمرهای رسانا ۸

۲-۳-۱- مفهوم تقویت ۸

۲-۳-۲- ماهیت مواد تقویت کننده ۹

۲-۳-۳- تقویت شیمیایی ۹

۲-۳-۴- تقویت الکتروشیمیایی ۱۱

۲-۳-۵- برگشت پذیری ۱۱

۲-۴- روش‌های تهیه پلیمرهای رسانا ۱۲

۲-۴-۱- پلیمر شدن شیمیایی ۱۲

۲-۴-۲- پلیمر شدن الکتروشیمیایی ۱۳

۲-۵- رسانایی پلیمرهای رسانا ۱۴

۲-۵-۱- نظریه نوار ۱۶

- ۱۹ ۲-۵-۲- مکانیزم رسانایی پلیمرهای رسانا
- ۲۰ ۶-۲- کاربردها
- ۲۱ ۲-۶-۱- باتری‌های با قابلیت شارژ مجدد
- ۲۱ ۲-۶-۲- وسایل الکتروکرومیک
- ۲۱ ۲-۶-۳- کاربردهای پزشکی
- ۲۱ ۲-۶-۴- حسگرها
- ۲۱ ۲-۶-۵- الکترودهای پلیمری
- ۲۲ ۲-۶-۶- انواع مواد هوشمند
- ۲۲ ۲-۷- معایب و مزایا

فصل سوم : پلی(آلکیل تیوفن)

- ۲۴ ۳-۱- تیوفن
- ۲۵ ۳-۲- پلی تیوفن
- ۲۵ ۳-۳- پیکربندی پلی آلکیل تیوفن‌ها
- ۲۷ ۳-۴- مکانیزم الکتروپلیمر شدن
- ۲۷ ۳-۴-۱- روش شیمیایی
- ۲۸ ۳-۴-۱-۱- روش مک کالو
- ۲۸ ۳-۴-۱-۲- روش ریک

۲۹ ۳-۴-۱-۳- روش پلیمر شدن اکسایشی

۳۰ ۳-۴-۲- روش الکتروشیمیایی

۳۱ ۳-۴-۲-۱- مکانیزم الکتروپلیمر شدن

۳۳ ۳-۴-۲-۲- اثر عوامل مختلف بر الکتروپلیمر شدن تیوفن

فصل چهارم: روش های محاسباتی

۳۶ ۴-۱- شیمی محاسباتی

۳۷ ۴-۲- روش های آغازین

۳۷ تقریب بورن اوپنهاইمر

۳۸ تقریب LCAO

۳۸ تقریب هارتری - فاک

۳۸ روش میدان خود سازگار

۴۰ برهم کنش آرایشی

۴۹ افزودن توابع قطبش پذیر

۵۰ افزودن توابع پخشی

۴۱ ۴-۳ نظریه تابعی چگالی

۴۵ ۴-۴-مجموعه پایه

۵۰	..... نرم افزارها ۵-۴
۵۱	..... هایپرکم ۱-۵-۴
۵۱	..... گوس ویو ۲-۵-۴
۵۲	..... گوسین ۳-۵-۴

فصل پنجم: محاسبات و نتایج

۵۴	..... بهینه سازی هندسه مولکولها ۱-۵
۵۶	..... محاسبات مونومرها ۲-۵
۶۰	..... محاسبات الیگومرها ۳-۵
۶۲	..... محاسبات ساختاری ۱-۳-۵
۶۹	..... محاسبات چگالی بار الکتریکی و چگالی اسپین ۲-۳-۵
۷۰	..... محاسبات الکترونی ۳-۳-۵

فصل ششم: بحث و نتیجه گیری

۷۴	..... بررسی مونومرها ۱-۶
۸۱	..... بررسی الیگومرها ۲-۶
۸۳	..... آنالیز ساختاری ۱-۲-۶
۹۰	..... توزیع بار و چگالی اسپین ۲-۲-۶

٩٣٣-٢-٦- خواص الکترونی

٩٩ آینده نگری

١٠١ منابع

فهرست شکل‌ها

- ۷-۱) الف: سیس-پلی‌استیلن، ب: ترانس-پلی‌استیلن ۷
- ۱۱-۲) اثر غلظت تقویت کننده بر رسانایی پلیمر ۱۱
- ۱۵-۳) مقایسه رسانایی مواد مختلف ۱۵
- ۱۶-۴) رسانایی پلیمرهای رسانای مختلف با مس مقایسه شده است ۱۶
- ۱۷-۵) نوارهای انرژی در رساناها، نیمه‌رساناها و نارساناها ۱۷
- ۱۸-۶) تغییرات زنجیر پلیمر در اثر تقویت ۱۸
- ۱۹-۷) در اثر تقویت شکاف نواری باریک‌تر می‌شود ۱۹
- ۲۰-۸) ایجاد نوارهای حد واسط در شکاف نواری پلیمرها ۲۰
- ۲۶-۱-۳) انواع دیم‌های احتمالی ۲۶
- ۲۶-۲-۳) انواع آرایش تری‌مرها در تشکیل تری(آلکیل تیوفن) ۲۶
- ۲۸-۳-۳) مکانیزم تولید پلی(آلکیل تیوفن) ۲۸
- ۲۹-۴-۳) مکانیزم تولید پلی(آلکیل تیوفن) ۲۹
- ۳۰-۵-۳) مکانیزم روش پلیمر شدن اکسایشی در تولید پلی(آلکیل تیوفن) ۳۰
- ۵۴-۱-۵) نمایش و نامگذاری ایزومرهای ۳- بوتیل تیوفن ۵۴
- ۵۶-۲-۵) نمایش نامگذاری ۳-آلکیل تیوفن ۵۶
- ۶۲-۳-۵) نامگذاری شده هگزا آلکیل تیوفن ۶۲
- ۶۷-۴-۵) نامگذاری پیوندهای تریمر ۳-آلکیل تیوفن ۶۷

- (۱-۶) نمایش طول پیوندهای استخلاف حلقه (R_{48}) در مونومرهای ۳- آلکیل تیوفن در سطح B3LYP/6-31G** ۷۵
- (۲-۶) نمایش تغییرات بار الکتریکی در موقعیت اتم C_3 (α') و اتم C_2 (α) رادیکال کاتیون مونومرهای ۳- آلکیل تیوفن در سطح B3LYP/6-31G** ۷۷
- (۳-۶) نمایش شکاف نواری مونومرهای ۳-آلکیل تیوفن در سطح HF/6-31G** ۷۸
- (۴-۶) نمایش تغییرات پتانسیل یونش مونومرهای ۳-آلکیل تیوفن در سطح B3LYP/6-31G** ۷۹
- (۵-۶) ساختار تریمر ۳ - متیل تیوفن (الف) رادیکال کاتیون (ب) الیگومر خنثی ۸۱
- (۶-۶) اندازه طول پیوندهای مزدوج در دیمرهای تیوفن، ۳- متیل تیوفن، ۳ - اتیل تیوفن و ۳- پروپیل تیوفن ۸۴
- (۷-۶) اندازه طول پیوندهای مزدوج در تریمرهای تیوفن، ۳- متیل تیوفن، ۳ - اتیل تیوفن، و ۳- پروپیل تیوفن ۸۵
- (۸-۶) اندازه طول پیوندهای مزدوج در تترامرهای تیوفن، ۳- متیل تیوفن، ۳ - اتیل تیوفن، و ۳- پروپیل تیوفن ۸۶
- (۹-۶) اندازه طول پیوندهای مزدوج در پنتامرهای تیوفن، ۳- متیل تیوفن، ۳ - اتیل تیوفن و ۳- پروپیل تیوفن ۸۷
- (۱۰-۶) اندازه طول پیوندهای مزدوج در هگزامرهای تیوفن، ۳- متیل تیوفن، ۳ - اتیل تیوفن و ۳- پروپیل تیوفن ۸۹
- (۱۱-۶) نمایش تغییرات بار الکتریکی اتم C_1 بر اساس افزایش طول زنجیر در الیگومرهای ۳- آلکیل تیوفن ۹۲

(۱۲-۶) نمایش تغییرات شکاف نواری الیگومرها برحسب افزایش طول زنجیر الیگومر در سطح

۹۶..... B3LYP/6-31G**

(۱۳-۶) نمایش تغییرات IP الیگومرهای ۳- آلکیل تیوفن در سطح B3LYP/6-31G**..... ۹۸

فهرست جداول

- ۴۵.....(۱-۴) نام، نوع و مخفف تعدادی از روش‌های نظریه تابعی چگالی
- ۵۵.....(۱-۵) مقایسه خواص ایزومرهای بوتیل تیوفن
- ۵۵.....(۲-۵) مقایسه خواص ایزومرهای بوتیل تیوفن
- ۵۷.....(۳-۵) برخی از پارامترهای ساختاری مونومرها در سطح B3LYP/6-31G**
- ۵۸.....جدول ۴-۵- بار الکتریکی (چگالی اسپین) ۳- آلکیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**
- ۵۹.....(۵-۵) انرژی‌های اوربیتالی و شکاف نواری در سطح B3LYP/6-31G**
- ۶۰.....(۶-۵) محاسبه انرژی الکترونی ۳- آلکیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**
- ۶۱.....(۷-۵) محاسبه انرژی‌های الکترونی سه ساختار متفاوت دیمرها ۳- متیل تیوفن
- ۶۱.....(۸-۵) انرژی‌های الکترونی دو ساختار متفاوت تریمرهای- آلکیل تیوفن
- ۶۳.....(۹-۵) مقادیر طول پیوندهای سیستم مزدوج الیگوتیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**
- B3LYP/6-31G** (۱۰-۵) مقادیر طول پیوندهای سیستم مزدوج الیگومتیل تیوفن‌ها در سطح
- ۶۴.....
- ۶۵.....(۱۲-۵) مقادیر طول پیوندهای سیستم مزدوج الیگواتیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**
- ۶۶.....(۱۳-۵) مقادیر طول پیوندهای سیستم مزدوج الیگوپروپیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**
- ۶۷.....(۱۴-۵) مقادیر زوایای دووجهی در الیگوتیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**

- ۶۸..... B3LYP/6-31** سطح در الیگومتیل تیوفن ها در سطح (۱۵-۵)
- ۶۸..... B3LYP/6-31** سطح در الیگواتیل تیوفن ها در سطح (۱۶-۵)
- ۶۸..... B3LYP/6-31** سطح در الیگوپروپیل تیوفن ها در سطح (۱۶-۵)
- ۶۹..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو (چگالی اسپین) الیگو تیوفن ها در سطح (۱۷-۵) مقادیر بار الکتریکی
- ۶۹..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو متیل تیوفن ها در سطح (۱۸-۵) مقادیر بار الکتریکی (چگالی اسپین)
- ۷۰..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو اتیل تیوفن ها در سطح (۱۹-۵) مقادیر بار الکتریکی (چگالی اسپین)
- ۷۰..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو پروپیل تیوفن ها در سطح (۲۰-۵) مقادیر بار الکتریکی (چگالی اسپین)
- ۷۱..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو تیوفن ها در سطح (۲۱-۵) انرژی اوربیتال های پیشانی الیگو تیوفن ها در سطح
- ۷۱..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو متیل تیوفن ها در سطح (۲۲-۵) انرژی اوربیتال های پیشانی الیگو متیل تیوفن ها در سطح
- ۷۱..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو اتیل تیوفن ها در سطح (۲۳-۵) انرژی اوربیتال های پیشانی الیگو اتیل تیوفن ها در سطح
- ۷۲..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو پروپیل تیوفن ها در سطح (۲۴-۵) انرژی اوربیتال های پیشانی الیگو پروپیل تیوفن ها در سطح
- ۷۲..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگو تیوفن ها در سطح (۲۵-۵) انرژی الکترونی الیگو تیوفن ها در سطح
- ۷۲..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگومتیل تیوفن ها در سطح (۲۶-۵) انرژی الکترونی الیگومتیل تیوفن ها در سطح
- ۷۳..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگواتیل تیوفن ها در سطح (۲۷-۵) انرژی الکترونی الیگواتیل تیوفن ها در سطح
- ۷۳..... B3LYP/6-31G** سطح در الیگوپروپیل تیوفن ها در سطح (۲۸-۵) انرژی الکترونی الیگوپروپیل تیوفن ها در سطح

(۱-۶) مقایسه شکاف نواری و پتانسیل یونش محاسبه شده برای مونومرهای ۳- آلکیل تیوفن در سطح

۷۷.....B3LYP/6-31G**

(۲-۶) شکاف نواری و پتانسیل یونش محاسبه شده برای الیگوتیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-31G**

۹۴.....

(۳-۶) شکاف نواری و پتانسیل یونش محاسبه شده برای الیگومتیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-

۹۴.....31G**

(۴-۶) شکاف نواری و پتانسیل یونش محاسبه شده برای الیگواتیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-

۹۵.....31G**

(۵-۶) شکاف نواری و پتانسیل یونش محاسبه شده برای الیگوپروپیل تیوفن‌ها در سطح B3LYP/6-

31G**

فصل اول

مقدمه

پلیمرها مولکولهای بزرگی هستند که از واحدهای تکراری ساده تشکیل شده‌اند. این نام از یک نام یونانی به نام پلی^۱ که به معنی چند تا و مر^۲ که به معنی قسمت می باشد مشتق شده است. ماکرومولکول^۳ مترادف با پلیمر می باشد پلیمرها از مولکولهای ساده‌ای به نام مونومر^۴ به معنی قسمت واحد ساخته شده‌اند. اگر تعداد کمی از مونومرها به هم متصل شوند پلیمری با وزن مولکولی کم حاصل شده که الیگومر^۵ (کلمه یونانی oligos یعنی کم) نامیده می شود [۱].

پلیمرها انواع زیاد و کاربردهای بسیار گسترده‌ای دارند و بسیاری از جنبه های زندگی ما را پوشش داده‌اند. از این رو علم پلیمر به صورت یک علم جذاب درآمدی است و محققان فراوانی در سرتاسر جهان در مورد روشهای تولید ساده‌تر اقتصادی‌تر و تولید پلیمرهای جدیدتر با خواص بهتر و کاربردهای به روزتر و بهینه‌تر در تلاش هستند. دسته‌ای از این گروه مواد، پلیمرهای مزدوج^۶ هستند. یک پلیمر مزدوج در زنجیر خود پیوندهای یگانه و دوگانه متناوب دارد و در حقیقت از یک مونومر غیراشباع پدید آمده است. تا حدود ۴۰ سال پیش کسی تصور نمی‌کرد که یک پلیمر یا پلاستیک بتواند رسانای جریان الکتریسته باشد و اساساً پلیمرها جزء مواد نارسانا یا عایق^۷ اند و حتی به عنوان پوشش های عایق الکتریکی کاربرد دارند. اما از اوایل دهه‌ی هفتاد میلادی که پلیمرهای مزدوج تولید شدند، این تصورات تغییر کرد. پلیمرهای مزدوج می‌توانند رسانا باشند و الکترون‌ها را در طول زنجیر خود جا به جا کنند. این کشف شگفت انگیز شاخه جدیدی را در دانش پلیمر به نام پلیمرهای رسانای الکتریکی^۸ ایجاد کرده است که توجه دانشمندان زیادی را به خود جلب کرده است.

¹ Poly

² mer

³ macromolecule

⁴ monomer

⁵ Oligomer

⁶ Conjugated Polymers

⁷ Insulator

⁸ Electrically Conductive Polymers

اگر چه رسانایی پلیمرهای مزدوج در حد فلزاتی چون نقره، مس و حتی آهن نیست، اما تلفیقی از خواص فلزی (رسانایی) و پلیمری، این مواد را هم از فلزات و هم از پلیمرها متمایز و ممتاز کرده است. در حقیقت هر چند این مواد به عنوان پلیمرهای رسانا شناخته می‌شوند اما تنها خاصیت رسانایی آنها نیست که آنها را مورد توجه قرار داده است. به عنوان مثال گفته می‌شود که هزینه محافظت از خوردگی پل گلدن گیت^۱ در سانفرانسیسکو سالانه ۲۷ میلیارد دلار است. چنین هزینه‌های گزافی توجه به روش‌های نوین، کم‌هزینه و کارآمدتر به جای روش‌های سنتی محافظت از خوردگی را بیشتر کرده است. یکی از این روش‌ها پوشش دهی فولاد با پلی مرهای رسانا برای بهبود مقاومت به خوردگی است [۲]. پلیمرهای مزدوج مجموعه‌ای از خواص الکتریکی، خصوصیات پلیمری نظیر انعطاف پذیری، چگالی کم، بهبود پذیری آسان ساختار و خواص نوری و دیگر ویژگی‌های جالب توجه را دارا هستند [۳]. چنین ویژگی‌هایی است که محققان را بر آن داشته است که در جهت رفع برخی عیوب این مواد نظیر حلالیت کم و... و یا بهبود خواص مفید آنها تلاش گسترده‌ای انجام دهند. امروزه به دلیل آن که پلیمرهای مزدوج رسانایی قابل ملاحظه‌ای دارند به آنها فلزات آلی^۲ یا فلزات سنتزی^۳ گفته می‌شود و نقش آن‌ها در صنایع، پزشکی و سایر امور زندگی غیر قابل انکار است. اهمیت این مواد تا اندازه‌ای است که به آنها مواد قرن بیست و یکم گفته می‌شود [۴].

پلی‌استیلن^۴ اولین پلیمر مزدوجی بود که رسانایی آن مورد توجه قرار گرفت و تحقیقات درباره آن آغاز شد. پژوهش‌هایی که در مورد این پلیمر صورت گرفت نشان داد که سنتز آن به شکل فیلم پلیمری و همچنین تقویت^۵ آن با عوامل اکسنده و کاهنده‌ای چون هالوژن‌ها و ترکیباتی مثل $FeCl_3$ ، I_2 تاثیر بسیار زیادی بر افزایش رسانایی این پلیمر دارد. در واقع این مطلب مشخص گردید که رسانایی پلیمرهای رسانا ثابت نیست و بسته به شرایط سنتزی و نوع تقویتی که روی آنها انجام

¹ Golden Gate Bridge

² Organic Metals

³ Synthetic Metals

⁴ Poly acetylene

⁵ Doping