

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش حالت جامد)

خواص وابسته به جریان الکتریکی سلول‌های خورشیدی آلی: یک روش مدار معادل

توسط:

امیر ابراهیمی

استادان راهنما:

دکتر سید احمد کتابی

دکتر عباس بهجت

استاد مشاور:

دکتر سید محمد باقر قرشی

بهمن ماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش حالت جامد)

خواص وابسته به جریان الکتریکی سلول‌های خورشیدی آلی: یک روش مدار معادل

توسط:

امیر ابراهیمی

استادان راهنما:

دکتر سید احمد کتابی

دکتر عباس بهجت

استاد مشاور:

دکتر سید محمد باقر قرشی

بهمن ماه ۱۳۹۰

خواص وابسته به جریان الکتریکی سلول‌های خورشیدی آلی؛ یک روش مدار معادل

به وسیله‌ی:

امیر ابراهیمی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی

از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

فیزیک (گرایش حالت جامد)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تأیید شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر سید احمد کتابی، دانشیار فیزیک ماده‌چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد راهنما)

دکتر عباس بهجت، استاد فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک دانشگاه یزد (استاد راهنما)

دکتر سید محمد باقر قرشی، استادیار فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان (استاد مشاور)

دکتر حسین چراغچی، استادیار فیزیک ماده‌چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد داور)

دکتر محمد مهدی باقری محقق، استادیار فیزیک ماده‌چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد داور)

دکتر سهیل خوشبین‌فر، استادیار فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (نماینده تحصیلات تکمیلی)

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به:

همسر

به خاطر صبوری اش

پدر و مادر

به خاطر دلوزی و حمایت ایشان

دیگر اعضای خانواده ام

به خاطر سال های خوشی که با آنها داشته ام

سپاس گذاری

خداوند یکتا را شکر می گویم، که همه جاود هر لحظه به این بنده ی حقیر کمک کرد تا بار دیگر مرحله ی دیگری از تحصیل را پشت سر گذارم. همچنین از استادان راهنمای بنده جناب آقای دکتر سید احمد کتابی، که در همه ی مواقع پشتیبان و حامی من در دوران تحصیل کارشناسی ارشد بوده اند، جناب آقای دکتر عباس بخت به خاطر لطف و مساعدت های بی دریغ شان، همچنین استاد مشاورم جناب آقای سید محمد باقر قرشی که در کلیه مراحل انجام این پایان نامه از راهنمایی ها و کمک های شان بهره بردم، و نیز کلیه دوستان و همکلاسی های دوره تحصیل که روزهای خوبی با آنها داشتم، از جمله آقای حسن غنیمی که در مراحل تدوین و ویرایش این اثر کمک شایانی به بنده نموده اند کمال شکر را دارم.

از پدر و مادرم که در همه دوران زندگی، یار و یاور من، و در همه زمینه ها پشتوانه ای محکم برای من بوده اند و دلوزانه به من کمک کرده اند از صمیم قلب سپاس گذارم.

از همسرم به خاطر سالهای تحصیل، که دور از او بودم و تحتهای بسیاری را در این دوره گل کرده اند و باهمه ی مشکلاتی که داشتم کنار آمدند بسیار قدر دانی می کنم.

از خواهران و برادرانم و دیگر اعضای خانواده ام که همیشه آرزوی بودن دکترشان را می کنم نیز شکر کرده و برای همه شان آرزوی موفقیت و کسبانی را دارم.

با شکر: امیر ابراهیمی

چکیده

خواص وابسته به جریان الکتریکی سلول‌های خورشیدی آلی: یک روش مدار معادل

به وسیله‌ی:

امیر ابراهیمی

افزایش مصرف انرژی و بالا رفتن هزینه آن در جهان، جستجوی گزینه‌های جدید انرژی را ایجاب می‌کند. انرژی خورشیدی یکی از در دسترس‌ترین و پاک‌ترین منابع است. در سال‌های اخیر نیم‌رساناهای آلی به دلیل مزایای گوناگونی از قبیل سنتز کم‌هزینه و آسان و انعطاف‌پذیر بودن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پایان‌نامه، ابتدا سلول‌های خورشیدی معرفی، سپس سلول‌های خورشیدی معدنی و آلی و سازوکار ترابرد جریان الکتریکی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این مدل‌های موجود برای دست‌یابی به مشخصه جریان - ولتاژ سلول‌های خورشیدی، پارامترهای این مدل‌ها و مشخصه تجربی جریان - ولتاژ آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. همچنین چند روش ریاضی مربوط به این مدل‌ها برای محاسبه این پارامترها ارائه شده و در ادامه این روش‌ها را برای یک نمونه سلول خورشیدی معدنی و شش نمونه آلی به کار می‌بریم. در محاسبات ما ساختار اصلی نمونه‌های آلی به صورت ITO/PEDOT:PSS/CuPc/C60/Buffer layer/Cu استفاده از نتایج محاسبات برای روش تحلیلی پنج نقطه، روش بهینه‌سازی رسانایی با استفاده از تابع لامبرت، و روش تکرار، با مشخصه تجربی جریان - ولتاژ نمونه‌ها توافق خوبی را نشان می‌دهد. در روش تحلیلی پنج نقطه از توان بیشینه، ولتاژ مدارباز، جریان اتصال کوتاه و شیب منحنی در این دو نقطه استفاده می‌شود. در روش بهینه‌سازی رسانایی از مشتق جریان نسبت به ولتاژ مشخصه جریان - ولتاژ تجربی استفاده می‌شود. پارامترهای محاسبه‌شده نظیر جریان نوری، مقاومت‌های سری و موازی، فاکتور ایده‌آل و جریان اشباع معکوس می‌باشند. هم‌چنین با استفاده از این روش‌ها، تأثیر وجود لایه بافر در تعیین پارامترهای فوق بررسی می‌نماییم. نتایج ما نشان می‌دهد که بدون لایه بافر سلول خورشیدی دارای پایین‌ترین ترین بازده و بالاترین مقاومت سری در مدار و نمونه با لایه بافر BCP دارای بالاترین بازده و پایین‌ترین مقاومت سری در مدار می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: سلول‌های خورشیدی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تاریخچه سلول‌های خورشیدی.....	۴
۳-۱- سلول‌های خورشیدی معدنی.....	۵
۱-۳-۱- ساز و کار سلول خورشیدی معدنی بر پایه پیوندگاه p-n.....	۶
۴-۱- سلول‌های خورشیدی آلی.....	۸
۱-۴-۱- مواد به کار رفته به عنوان الکتروود در سلول‌های آلی.....	۹
۲-۴-۱- لایه‌های بافر (میانجی - میان لایه).....	۱۰
۳-۴-۱- اساس کار سلول‌های خورشیدی آلی.....	۱۱
۱-۳-۴-۱- جذب فوتون.....	۱۱
۲-۳-۴-۱- پخش اکسیتون.....	۱۳
۳-۳-۴-۱- جدایی اکسیتون.....	۱۳
۴-۳-۴-۱- ترابرد بار.....	۱۴
۵-۳-۴-۱- انباشت بار.....	۱۴
۴-۴-۱- ساختارهای سلول‌های خورشیدی آلی.....	۱۵
۱-۴-۴-۱- سلول‌های تک لایه.....	۱۵
۲-۴-۴-۱- سلول‌های دولایه.....	۱۷
۳-۴-۴-۱- سلول‌های چندپیوندی مخروطی دولایه.....	۱۹

فصل دوم: مدل سازی سلول های خورشیدی.....	۲۵
۱-۲- مقدمه.....	۲۵
۲-۲- سلول خورشیدی ایده آل.....	۲۵
۳-۲- مدل یک دیودی.....	۲۷
۴-۲- مدل دو دیودی.....	۲۸
۵-۲- مشخصه های تجربی سلول های خورشیدی.....	۲۹
۱-۵-۲- ولتاژ مدار باز.....	۲۹
۲-۵-۲- جریان مدار کوتاه.....	۳۱
۳-۵-۲- نقطه حداکثر توان.....	۳۱
۴-۵-۲- فاکتور انباشتگی.....	۳۱
۵-۵-۲- بازده توان.....	۳۳
۶-۵-۲- بازده کوانتومی خروجی η_{EQE}	۳۳
۶-۲- پارامترهای مدل یک دیودی.....	۳۴
۱-۶-۲- جریان نوری I_{ph}	۳۴
۲-۶-۲- فاکتور ایده آل n	۳۶
۲-۶-۲- باز ترکیب از طریق نواقص شبکه.....	۳۷
۲-۶-۲- باز ترکیب تابشی (نوار به نوار).....	۳۸
۲-۶-۳- باز ترکیب اوژه.....	۳۸
۲-۶-۳- مقاومت موازی R_{sh}	۴۱
۲-۶-۴- مقاومت موازی R_s	۴۲
۲-۶-۵- جریان اشباع معکوس.....	۴۵
فصل سوم: روش های تعیین پارامترهای مدار معادل سلول های خورشیدی.....	۴۷
۱-۳- مدل یک دیودی.....	۴۷
۱-۳-۱- روش اول (روش بهینه سازی عمودی).....	۴۷
۳-۱-۲- روش دوم (برازش غیر خطی با استفاده از تابع لامبرت).....	۴۸
۳-۱-۳- روش سوم (روش تحلیلی پنج نقطه).....	۵۰
۳-۱-۴- روش چهارم (بهینه سازی رسانایی).....	۵۶
۳-۱-۵- روش پنجم (بهینه سازی رسانایی با استفاده از جریان کمکی).....	۵۷
۳-۱-۶- روش ششم (بهینه سازی رسانایی با استفاده از تابع لامبرت).....	۵۹

۶۰	۷-۱-۳- روش هفتم (بهینه‌سازی با استفاده از تابع کمکی).....
۶۱	۸-۱-۳- روش هشتم (برازش خطی مشخصه جریان- ولتاژ).....
۶۲	۹-۱-۳- روش نهم (برازش غیر خطی ولتاژ $V=f(I)$).....
۶۴	۱۰-۱-۳- روش دهم (حل تحلیلی دقیق با استفاده از تابع دو منظوره).....
۶۸	۱۱-۱-۳- روش یازدهم (روش تکرار).....
۶۹	۲-۳- مدل دو دیودی.....
۶۹	۱-۲-۳- روش اول (روش پنج نقطه).....
۷۲	۲-۲-۳- روش دوم (روش تکرار).....
۷۵	فصل چهارم: نتایج و محاسبات
۷۵	۱-۴: مقدمه.....
۷۶	۴-۱-۱- الکتروود شفاف (آند).....
۷۶	۴-۱-۲- فلز مس (کاتد).....
۷۶	۴-۱-۳- پلیمر رسانا PEDOT:PSS.....
۷۷	۴-۱-۴- لایه بافر.....
۷۷	۴-۱-۵- نیم‌رساناهای آلی بخشنده و پذیرنده.....
۷۸	۴-۱-۶- لایه‌نشانی مواد آلی.....
۷۸	۴-۱-۷- لایه‌ی بافر LiF.....
۷۹	۴-۲- بررسی منحنی مشخصه تجربی جریان- ولتاژ.....
۸۰	۴-۳-۱- مدل یک‌دیودی.....
۸۰	۴-۳-۱- روش سوم.....
۸۷	۴-۳-۲- روش چهارم.....
۹۱	۴-۳-۳- روش پنجم.....
۹۵	۴-۳-۴- روش ششم.....
۹۸	۴-۳-۵- روش هفتم.....
۹۹	۴-۳-۶- روش هشتم.....
۹۹	۴-۳-۷- روش نهم.....
۱۰۳	۴-۳-۸- روش دهم.....
۱۰۶	۴-۳-۹- روش یازدهم.....
۱۱۰	۴-۴- مدل دو دیودی.....

۱۱۰	.....۱-۴-۴- روش اول
۱۱۴	.....۲-۴-۴- روش دوم
۱۳۲	.....۵-۴- نتیجه گیری
۱۳۲	.....۱-۵-۴- روش اول
۱۳۲	.....۲-۵-۴- روش دوم
۱۳۲	.....۳-۵-۴- روش سوم
۱۳۳	.....۴-۵-۴- روش چهارم
۱۳۳	.....۵-۵-۴- روش پنجم
۱۳۴	.....۶-۵-۴- روش ششم
۱۳۴	.....۷-۵-۴- روش هفتم
۱۳۴	.....۸-۵-۴- روش هشتم
۱۳۵	.....۹-۵-۴- روش نهم
۱۳۵	.....۱۰-۵-۴- روش دهم
۱۳۶	.....۱۱-۵-۴- روش یازدهم
۱۳۶	.....۱۲-۵-۴- روش اول مدل دو دیودی
۱۳۶	.....۱۳-۵-۴- روش دوم مدل دو دیودی
۱۳۷	.....۶-۴- مقایسه روش های معرفی شده
۱۳۹	.....۷-۴- پیشنهادات
۱۴۰	.....منابع

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان و شماره
۳۵	جدول ۱-۲: پارامترهای سلول خورشیدی بر حسب شدت نور فرودی (I_L).....
۸۳	جدول ۱-۴: حدس‌های اولیه مقاومت سری و فاکتور ایده‌آل برای سلول‌های خورشیدی معدنی و آلی
۸۴	جدول ۲-۴: پارامترهای محاسبه‌شده از روش سوم برای پنج نمونه
۸۶	جدول ۳-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه
۸۷	جدول ۴-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش چهارم
۹۰	جدول ۵-۴: خطاهای روش چهارم به‌زای جریان اشباع معکوس جایگذاری شده از روش سوم
۹۱	جدول ۶-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده سلول‌های خورشیدی با استفاده از روش چهارم
۹۲	جدول ۷-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش پنجم
۹۴	جدول ۸-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول‌های خورشیدی موجود
۹۵	جدول ۹-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده برای سلول‌های خورشیدی از روش ششم
۹۸	جدول ۱۰-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش ششم برای سلول‌های خورشیدی موجود
۹۹	جدول ۱۱-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش هفتم برای نمونه‌های مورد نظر
۹۹	جدول ۱۲-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش هشتم برای نمونه‌های مورد نظر
۱۰۰	جدول ۱۳-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش نهم برای سلول‌های خورشیدی موجود
۱۰۳	جدول ۱۴-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش نهم برای سلول‌های خورشیدی موجود
۱۰۴	جدول ۱۵-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش دهم برای سلول‌های خورشیدی نمونه
۱۰۶	جدول ۱۶-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش دهم برای سلول‌های خورشیدی نمونه
۱۰۷	جدول ۱۷-۴: پارامترهای محاسبه‌شده از روش یازدهم برای سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه
۱۱۰	جدول ۱۸-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش یازدهم برای سلول‌های خورشیدی موجود
۱۱۱	جدول ۱۹-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش اول مدل دودیودی برای سلول‌های خورشیدی موجود ..
۱۱۳	جدول ۲۰-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول‌های خورشیدی.....
۱۱۴	جدول ۲۱-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول‌های خورشیدی موجود..
۱۱۷	جدول ۲۲-۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول‌های خورشیدی
۱۱۸	جدول ۲۳-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول معدنی
۱۱۹	جدول ۲۴-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی A..
۱۲۰	جدول ۲۵-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی B..
۱۲۱	جدول ۲۶-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی C..
۱۲۲	جدول ۲۷-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی D..
۱۲۲	جدول ۲۸-۴: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی E..

- جدول ۴- ۲۹: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مدل یک‌دیودی برای سلول خورشیدی F ... ۱۲۳
- جدول ۴- ۳۰: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی معدنی ۱۲۴
- جدول ۴- ۳۱: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی A ۱۲۵
- جدول ۴- ۳۲: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی B ۱۲۵
- جدول ۴- ۳۳: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی D ۱۲۵
- جدول ۴- ۳۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی E ۱۲۶
- جدول ۴- ۳۵: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مختلف برای سلول خورشیدی F ۱۲۶
- جدول ۴- ۳۶: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی معدنی ۱۲۶
- جدول ۴- ۳۷: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی A ۱۲۷
- جدول ۴- ۳۸: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی B ۱۲۷
- جدول ۴- ۳۹: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی C ۱۲۷
- جدول ۴- ۴۰: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی D ۱۲۷
- جدول ۴- ۴۱: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی E ۱۲۷
- جدول ۴- ۴۲: پارامترهای به‌دست‌آمده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی F ۱۲۷
- جدول ۴- ۴۳: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول معدنی ۱۲۸
- جدول ۴- ۴۴: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی A ۱۲۸
- جدول ۴- ۴۵: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی B ۱۲۸
- جدول ۴- ۴۶: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی C ۱۲۸
- جدول ۴- ۴۷: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی D ۱۲۹
- جدول ۴- ۴۸: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی E ۱۲۹
- جدول ۴- ۴۹: داده‌های تجربی و محاسبه‌شده از روش‌های مدل دودیودی برای سلول خورشیدی F ۱۲۹
- جدول ۴- ۵۰: روش یازدهم برای مقایسه پارامترها به‌ترتیب افزایش مقاومت سری ۱۳۷
- جدول ۴- ۵۱: پارامترهای تجربی به‌دست‌آمده از روش یازدهم برای نمونه‌های آلی ۱۳۸

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: نمودار تولید سالانه جهانی سلول‌های فوتو ولتائیک.....	۲
شکل ۲-۱: تولید غلتک به غلتک پلاستیک فوتو ولتائیک.....	۳
شکل ۳-۱: میانگین هزینه بر وات برای مدول‌های فوتوولتائیک از سال ۲۰۰۶-۱۹۷۵.....	۳
شکل ۴-۱: نمودار طرحواره یک سلول خورشیدی معدنی بر پایه پیوند p-n.....	۶
شکل ۵-۱: نمودار طرحواره ساختار پیوند p-n.....	۷
شکل ۶-۱: نمودار چگالی جریان اتصال کوتاه برحسب ولتاژ مدارباز برای چند نمونه‌ی معدنی.....	۸
شکل ۷-۱: ساختار شیمیایی برخی از ترکیبات آلی.....	۹
شکل ۸-۱: نمودار طرحواره اساس کار سلول‌های خورشیدی آلی.....	۱۲
شکل ۹-۱: نمودار نوار انرژی یک سلول خورشیدی آلی تک‌لایه، تصویر MIM.....	۱۶
شکل ۱۰-۱: نمودار نوار انرژی یک سلول خورشیدی آلی تک‌لایه، سد شاتکی.....	۱۶
شکل ۱۱-۱: نمودار نوار کلی یک ماده‌ی آلی.....	۱۸
شکل ۱۲-۱: نمودار طرحواره سلول چندپیوندی (HJ) دولایه.....	۱۸
شکل ۱۳-۱: نمودار طرحواره باند انرژی کلی یک سلول خورشیدی چندپیوندی مخروطی.....	۲۱
شکل ۱۴-۱: نمودار طرحواره ریخت‌شناسی سلول خورشیدی چندپیوندی مخروطی.....	۲۱
شکل ۱۵-۱: نمودار طرحواره لایه‌های یک سلول خورشیدی چندپیوندی دهنده/پذیرنده مخروطی نمونه.....	۲۱
شکل ۱-۲: منحنی جریان- ولتاژ یک دیود ایده‌آل در تاریکی و تحت تابش نور.....	۲۶
شکل ۲-۲: مدار معادل یک سلول خورشیدی ایده‌آل.....	۲۷
شکل ۳-۲: مدل یک دیودی مدار معادل سلول خورشیدی.....	۲۷
شکل ۴-۲: مدل دو دیودی برای سلول‌های خورشیدی و اجزای آن.....	۲۸
شکل ۵-۲: وابستگی دمایی ولتاژ مدارباز Voc در شدت‌های نور فرودی مختلف.....	۳۰
شکل ۶-۲: مشخصه تجربی جریان- ولتاژ و توان- ولتاژ یک سلول خورشیدی ایده‌آل.....	۳۲
شکل ۷-۲: وابستگی دمایی ولتاژ مدارباز FF در شدت‌های نور فرودی مختلف.....	۳۲
شکل ۸-۲: مشخصه چگالی جریان- ولتاژ ITO/Pentacene(45nm)/C ₆₀ (50nm)/BCP(10nm)/Al تحت تابش نور پهن‌بند (۹۰۰-۳۵۰ nm) در شدت نور فرودی متغییر I _L	۳۴
شکل ۹-۲: فرآیندهای بازترکیب در نیمرسانا.....	۳۶
شکل ۱۰-۲: نمودار تغییرات مشخصه‌ی سلول خورشیدی برحسب تغییرات فاکتور ایده‌آل.....	۳۹
شکل ۱۱-۲: تأثیر ضخامت لایه فعال روی ولتاژ مدار باز و مقاومت موازی.....	۴۲

- شکل ۲- ۱۲: تأثیر ضخامت لایه فعال روی چگالی جریان اتصال کوتاه و مقاومت سری..... ۴۳
- شکل ۲- ۱۳: نمودار تغییرات فاکتور انباشتگی بر حسب تغییرات لایه‌ی فعال..... ۴۳
- شکل ۲- ۱۴: نمودار مشخصه جریان- ولتاژ برای سلول خورشیدی با مقادیر مختلف مقاومت موازی..... ۴۴
- شکل ۲- ۱۵: نمودار مشخصه جریان- ولتاژ برای سلول خورشیدی با مقادیر مختلف مقاومت سری..... ۴۴
- شکل ۴- ۱: نمودار طرحواره نمونه‌های آلی بررسی شده..... ۷۹
- شکل ۴- ۲: مشخصه تجربی سلول خورشیدی معدنی..... ۸۰
- شکل ۴- ۳: مشخصه‌های تجربی سلول‌های خورشیدی آلی..... ۸۱
- شکل ۴- ۴: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی معدنی..... ۸۱
- شکل ۴- ۵: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی A..... ۸۱
- شکل ۴- ۶: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی B..... ۸۲
- شکل ۴- ۷: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی C..... ۸۲
- شکل ۴- ۸: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی D..... ۸۲
- شکل ۴- ۹: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی E..... ۸۳
- شکل ۴- ۱۰: نمودار فاکتور ایده‌آل بر حسب مقاومت سری برای سلول خورشیدی آلی F..... ۸۳
- شکل ۴- ۱۱: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول خورشیدی معدنی..... ۸۴
- شکل ۴- ۱۲: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول خورشیدی آلی A..... ۸۵
- شکل ۴- ۱۳: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول خورشیدی آلی B..... ۸۵
- شکل ۴- ۱۴: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول خورشیدی آلی D..... ۸۵
- شکل ۴- ۱۵: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش سوم برای سلول خورشیدی آلی E..... ۸۶
- شکل ۴- ۱۶: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی A..... ۸۸
- شکل ۴- ۱۷: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی B..... ۸۸
- شکل ۴- ۱۸: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی C..... ۸۸
- شکل ۴- ۱۹: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی D..... ۸۹
- شکل ۴- ۲۰: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی E..... ۸۹
- شکل ۴- ۲۱: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی F..... ۸۹
- شکل ۴- ۲۲: نمودار تجربی و محاسبه‌شده با تصحیح جریان اشباع معکوس از روش چهارم برای سلول خورشیدی آلی..... ۹۰
- شکل ۴- ۲۳: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی معدنی..... ۹۲
- شکل ۴- ۲۴: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی A..... ۹۲
- شکل ۴- ۲۵: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی B..... ۹۳
- شکل ۴- ۲۶: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی C..... ۹۳
- شکل ۴- ۲۷: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی D..... ۹۳
- شکل ۴- ۲۸: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی E..... ۹۴
- شکل ۴- ۲۹: نمودار تجربی و محاسبه‌شده از روش پنجم برای سلول خورشیدی F..... ۹۴
- شکل ۴- ۳۰: نمودار تجربی و برازش‌شده سلول معدنی از روش ششم..... ۹۶
- شکل ۴- ۳۱: نمودار تجربی و برازش‌شده سلول خورشیدی A از روش ششم..... ۹۶
- شکل ۴- ۳۲: نمودار تجربی و برازش‌شده سلول خورشیدی B از روش ششم..... ۹۶

- شکل ۴-۳۳: نمودار تجربی و برازش شده سلول خورشیدی C از روش ششم..... ۹۷
- شکل ۴-۳۴: نمودار تجربی و برازش شده سلول خورشیدی D با استفاده از روش ششم..... ۹۷
- شکل ۴-۳۵: نمودار تجربی و برازش شده سلول خورشیدی E با استفاده از روش ششم..... ۹۷
- شکل ۴-۳۶: نمودار تجربی و برازش شده سلول خورشیدی F با استفاده از روش ششم..... ۹۸
- شکل ۴-۳۷: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی معدنی..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۸: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی A..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۹: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی B..... ۱۰۱
- شکل ۴-۴۰: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی C..... ۱۰۱
- شکل ۴-۴۱: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی D..... ۱۰۲
- شکل ۴-۴۲: نمودار تجربی و برازش شده از روش نهم برای سلول خورشیدی E..... ۱۰۲
- شکل ۴-۴۳: نمودار تجربی و برازش شده از روش دهم برای سلول خورشیدی معدنی..... ۱۰۴
- شکل ۴-۴۴: نمودار تجربی و برازش شده از روش دهم برای سلول خورشیدی آلی A..... ۱۰۴
- شکل ۴-۴۵: نمودار های تجربی و برازش شده از روش دهم برای سلول خورشیدی آلی B..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴۶: نمودار تجربی و برازش شده از روش دهم برای سلول خورشیدی آلی C..... ۱۰۶
- شکل ۴-۴۷: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی معدنی..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۸: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی A..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۹: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی B..... ۱۰۸
- شکل ۴-۵۰: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی C..... ۱۰۸
- شکل ۴-۵۱: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی D..... ۱۰۹
- شکل ۴-۵۲: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی E..... ۱۰۹
- شکل ۴-۵۳: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش یازدهم برای سلول خورشیدی F..... ۱۰۹
- شکل ۴-۵۴: شکل نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول معدنی..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۵: شکل نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول خورشیدی A..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۶: شکل نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول خورشیدی B..... ۱۱۲
- شکل ۴-۵۷: شکل نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول خورشیدی C..... ۱۱۲
- شکل ۴-۵۸: شکل نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول خورشیدی D..... ۱۱۲
- شکل ۴-۵۹: نمودار تجربی و برازش شده از روش اول مدل دودیودی برای سلول خورشیدی E..... ۱۱۳
- شکل ۴-۶۰: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول خورشیدی معدنی..... ۱۱۴
- شکل ۴-۶۱: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل یک دیودی برای سلول خورشیدی A..... ۱۱۵
- شکل ۴-۶۲: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل یک دیودی برای سلول خورشیدی B..... ۱۱۵
- شکل ۴-۶۳: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل یک دیودی برای سلول خورشیدی C..... ۱۱۵
- شکل ۴-۶۴: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول خورشیدی D..... ۱۱۶

- شکل ۴-۶۵: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول خورشیدی E.....۱۱۶
- شکل ۴-۶۶: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش دوم مدل دودیودی برای سلول خورشیدی F.....۱۱۶
- شکل ۴-۶۷: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۵ و ۶ برای سلول خورشیدی معدنی.....۱۱۸
- شکل ۴-۶۸: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۹، ۱۰ و ۱۱ برای سلول خورشیدی معدنی.....۱۱۸
- شکل ۴-۶۹: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۴، ۵ و ۶ برای سلول خورشیدی A.....۱۱۹
- شکل ۴-۷۰: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۹، ۱۰ و ۱۱ برای سلول خورشیدی A.....۱۱۹
- شکل ۴-۷۱: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۴، ۵ و ۶ برای سلول خورشیدی B.....۱۲۰
- شکل ۴-۷۲: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۹، ۱۰ و ۱۱ برای سلول خورشیدی B.....۱۲۰
- شکل ۴-۷۳: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۴، ۵ و ۶ برای سلول خورشیدی C.....۱۲۱
- شکل ۴-۷۴: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۹، ۱۰ و ۱۱ برای سلول خورشیدی C.....۱۲۱
- شکل ۴-۷۵: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱۱ برای سلول خورشیدی D.....۱۲۲
- شکل ۴-۷۶: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۳، ۴ و ۵ برای سلول خورشیدی E.....۱۲۳
- شکل ۴-۷۷: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۶، ۹ و ۱۱ برای سلول خورشیدی E.....۱۲۳
- شکل ۴-۷۸: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۴، ۵ و ۱۱ برای سلول خورشیدی F.....۱۲۴
- شکل ۴-۷۹: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول معدنی.....۱۲۹
- شکل ۴-۸۰: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول A.....۱۳۰
- شکل ۴-۸۱: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول B.....۱۳۰
- شکل ۴-۸۲: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول C.....۱۳۰
- شکل ۴-۸۳: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول D.....۱۳۱
- شکل ۴-۸۴: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش های ۱ و ۲ مدل دودیودی برای سلول E.....۱۳۱
- شکل ۴-۸۵: نمودار تجربی و محاسبه شده از روش ۲ مدل دودیودی برای سلول F.....۱۳۱

فصل اول

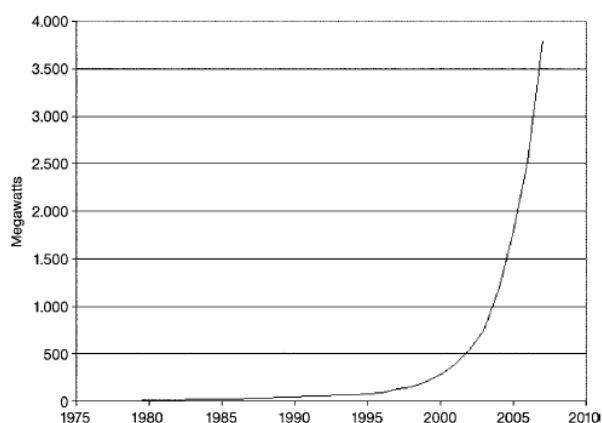
سلول‌های خورشیدی

فصل اول

سلول‌های خورشیدی

۱-۱- مقدمه

افزایش قیمت انرژی حاصل از فرآورده‌های نفتی، رو به پایان بودن آن و تغییرات آب و هوایی به دنبال آن، کشورها را به سمت جایگزینی انرژی‌های نو، تجدیدپذیر و کم‌هزینه سوق داده است. در این میان انرژی خورشیدی، به دلیل بی‌نهایت بودن ذخیره این منبع، رایگان بودن، نداشتن هیچ‌نوع آلودگی و تقریباً در اختیار بودن آن در تمام نقاط جهان، نسبت به سایر منابع انرژی از اهمیت بالاتری برخوردار است. نمودار ۱-۱ نشان می‌دهد که از چند دهه پیش تا به الان، توجه به این منبع تأمین انرژی تا چه حد بوده است [۱].

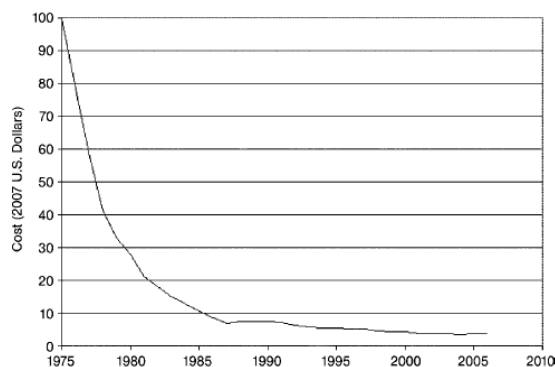


شکل ۱-۱: نمودار تولید سالانه جهانی سلول‌های فوتوولتائیک از سال ۱۹۷۵-۲۰۰۷ که به ۳,۸GW در انتهای سال ۲۰۰۷ می‌رسد، هر دو سال دو برابر می‌شود [۱].

در تحقیقات اخیر سلول‌های خورشیدی آلی به دلیل انعطاف‌پذیری، هزینه پایین‌تر تولید، ساخت آسان‌تر در سطوح گسترده و آلودگی زیست‌محیطی کمتر نسبت به سلول‌های معدنی، بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. مواد فوتوولتائیک آلی همانند تکنولوژی چاپ روزنامه، روی غلتهای از پلاستیک رسانا چاپ می‌شود و مواد زیادی را بدین طریق استفاده می‌کنند که روشی ساده و با بالاترین میزان تولید است (شکل ۱-۲). سلول‌های خورشیدی مبتنی بر روش‌های شیمیایی، نسبت به تولیدات قبلی دارای وزن کم‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر می‌باشند. این نوع جدید از سلول‌های فوتوولتائیک انعطاف‌پذیر را می‌توان در خیلی از کاربردهایی که در آن سلول‌های رایج قادر به استفاده نیستند، به کار برد. این سلول‌ها با کم‌ترین هزینه در ساختمان‌های حال حاضر، از پنجره‌ها تا سقف و دیوارهای خانه‌ها قابل استفاده است. میانگین قیمت یک مدول فوتوولتائیک شامل هزینه نصب و هزینه‌های دیگر سیستم‌ها، از تقریباً ۱۰۰ دلار در هر وات در سال ۱۹۷۵ به حدود ۴ دلار در هر وات در پایان سال ۲۰۰۷ رسیده است (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۲: الف) تولید غلتهای پلیستیک فوتوولتائیک. ب) چاپ جوهر نیمرسانای CIGS روی ورق آلومینیوم [۱].



شکل ۱-۳: میانگین هزینه بر وات برای مدول‌های فوتوولتائیک از سال ۱۹۷۵-۲۰۰۶ [۱].