مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۷- شماره ۱- سال ۱۴۰۱

www.ElitesJournal.ir

بررسی مدل موثر در کالیبراسیون پنل های خورشیدی

علی محمودلو

استادیار گروه علوم پایه دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

mahmodlou_ali@yahoo.com

ارسال: اسفند ماه ۱۴۰۰ پذیرش: فروردین ماه ۱۴۰۱

چکیده

ما یک مدل رقابتی را در صنعت صفحات خورشیدی توسعه داده‌ایم.شرکتهای مربوط به این صفحات ، صفحات خورشیدی را تولید میکنند که هم از نظر افقی و هم از نظر عمودی با هم متفاوت هستند، و از نظر کمیت مشخصات با هم رقابت میکنند. تعادل در مدل با واقعیات مستند شده که شامل تنوع در قیمت، سود حاصل از فروش و سهم بازار در بین شرکتها میشود، مطابقت دارد. ما مدل خود را با استفاده از داده‌های جدید از قیمت، هزینه و ارسال ، در شرکتهای خورشیدی پیشرو و همینطور در ۴ بازار پیشگام ، کالیبره کرده‌ایم. مدل کالیبره شده ، برای ارزیابی تاثیر کاهش قیمت پلی‌سیلیکون بر قیمت تعادلی صفحات خورشیدی استفاده شد . پلی‌سیلیکون یک ماده خام کلیدی برای تولید صفحات خورشیدی است.

کلمات کلیدی: پنل خورشیدی، سوخت فسیلی، مدول خورشیدی، کالیبراسیون خورشیدی، مدل رقابتی.

۱– مقدمه

بخش مربوط به تولید برق، بزرگترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. بیشتر طرحها برای متعادل کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای ، به فوتوولتاییک خورشیدی به عنوان یک تکنولوژی تولید برق نگاه می کنند که می تواند بخض قابل توجهی از تولید توسط سوخت فسیلی را با آن جایگزین کرد (ناکی سنوویچ و ریاحی ۲۰۰۲ ؛ بیکر و سولاک ۲۰۱۱؛ لوییس و نوسرا ۲۰۰۶) . با این حال در حال حاضر، برق حاصل از فوتوولتائیک خورشیدی، بخش کوچکی از برق جهان را تامین می کند. هزینه تولید برق با استفاده از سیستمهای PV خورشیدی، در طول زمان کاهش پیدا کرده است. عامل اصلی این کاهش قیمت ، بدلیل کاهش قیمت مداوم صفحات خورشیدی به عنوان مولفه اصلی در سیستمهای PV بوده است (که به آن مدول خورشیدی هم گفته می شود.). این کاهشها، باعث شده است که قیمت برق خورشیدی تولید شده به قیمت برق تولیدی از منابع معمول، نزدیکتر شود، اما با این حال همچنان فاصله‌ای میان این دو قیمت وجود دارد [۱].

بررسیهای گسترده‌ای در تحقیقات مختلف از عوامل کاهش قیمت مدول خورشیدی انجام گرفته است. بیشتر مطالعات موجود براساس منحنیهای یادگیری انجام میگیرد ، که به برونیابی قیمت مدول خورشیدی در برابر حجم تولید ورای انچه قابل مشاهده هست میپردازد [۲]. مطالعات دیگری هم مانند آنچه نمت (۲۰۰۶) و بروتون (۲۰۰۲) انجام دادن وجود دارد، که در این مطالعات آنها به سهم عوامل مختلف مانند ابعاد تاسیسات و بازده مدول در کاهش قیمت مدول خورشیدی پرداختند. مدلهای دارای منحنی یادگیری و همچنین مدلهایی مانند مدل نمت (۲۰۰۶) برای توضیح نحوه تاثیر عوامل مختلف بر قیمت مناسب هستند. استفاده از این مدلها در

پیش‌بینی تغییر در قیمت، به طور کلی بر این فرض قرار دارد که ، تغییر در قیمت ، به تغییر یکسان در هزینه ترجمه خواهد شد. اگر صنعت مدول خورشیدی، در حالت رقابتی کامل بود ، که در آن قیمت مدولهای خورشیدی نزدیک هزینه‌ی تولید آنها میبود، آنگاه هرگونه کاهش در هزینه ، منجر به همان مقدار کاهش در قیمت می شد. اما صنعت مدولهای خورشیدی، در حالت رقابتی کامل نیست. همانطور که در بخش ۲ مستند شده است [۳]، تفاوتهایی در قیمتها، اختلاف بین قیمت و هزینه، و سهم بازار در شرکتهای مختلف در این صنعت وجود دارد، که همه‌ی اینها نشانگر انحراف از فرض حالت رقابتی کامل است. در شرایط نیمه‌رقابتی ، تاثیر قیمت از تغییر در هزینه، به نحوه واکنش شرکتها به تغییر در هزینه بستگی دارد. استفاد از قیمت به جای هزینه در مدلهای منحنی یادگیری و در مدل نمت (۲۰۰۶) ، یک ساده سازی کاربردی را ارائه میدهد ، اما نادیده گرفتن نقش رقابت در بین شرکتها در تعیین قیمت تعادلی بدون عواقب نیست. برای مثال نمت (۲۰۰۶) دریافت که تغییر در عواملی که بر هزینه تاثیر می‌گذارند ، تنها میتواند بخشی از تغییر در قیمت مدولهای خورشیدی را در سالهای مورد مطالعه او توضیح دهد. او بیان میکند که در میزان رقابت در آن سالها افزایش وجود داشد، که میتواند به طور نسبی سهمی در تغییرات جزئی در قیمت در اثر تغییر در هزینه داشته باشد. هدف از این مقاله این است که مدلی را ارائه دهد که به روشنی در آن از میزان رقابت استفاده شده باشد و بتوان از آن برای ارزیابی نحوه تاثیر تغییرات هزینه در قیمت استفاده کرد [۴].

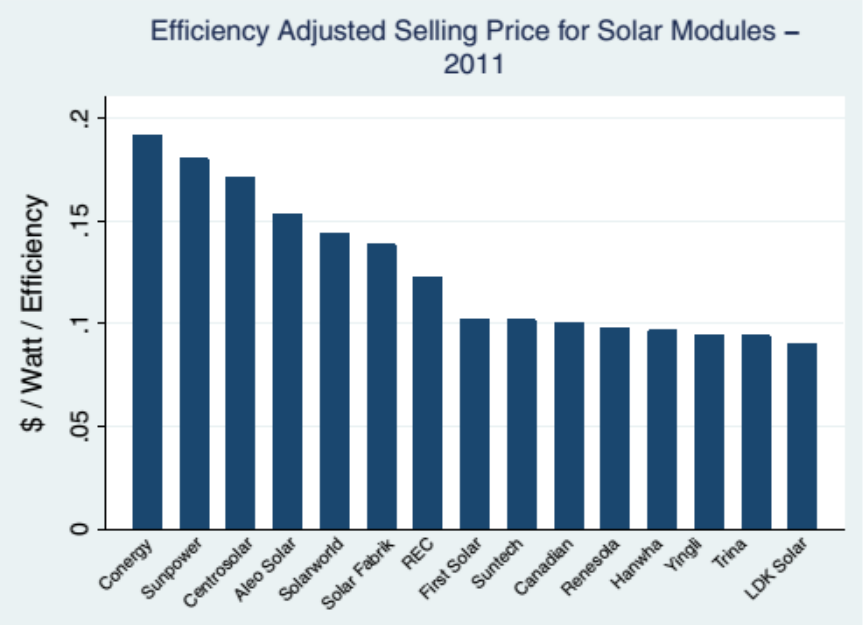
در این مقاله ما سه مشاهده تجربی را بیان میکنیم که به خصیصه‌های برجسته رقابت در این صنعت میپردازد. در ادامه ما مدلی را ارائه میدهیم که با این مشاهدات مطابقت دارد. این مدل یک تابع تقاضا را برا مدول خورشیدی ارائه می دهد، که در آن رفتار شرکتهای تاسیسات الکتریکی، تولید کنندگان برق، و تولید کنندگان مدول خورشیدی را به حساب می‌آورد. شرکتهای تاسیسات الکتریک ، که برق را به مصرف کننده می رسانند (یا به شکل مستقیم و یا از طریق شرکتهای توزیع محلی)، برق را از تولید کنندگان برق خورشیدی خریداری می کنند، که این تولید کنندگان می توانند خانه‌های فردی، و یا شرکتهای تجاری تولید برق خورشیدی باشند. این تولید کنندگان برق خورشیدی، خود مدولهای خورشیدی را از تولید کنندگان مدول خورشیدی خریداری می کنند. مدولهای خورشیدی که توسط کارخانه‌های مختلف تولید میشود از نظر افقی و قائم با هم متفاوت هستند.کارخانه‌های مدول با تعیین تعداد با یکدیگر به رقابت میپردازند و ما معادلاتی را ارائه میدهیم که میتوان از آنها برای محاسبه قیمتهای تعادلی، اختلاف بین هزینه و قیمت، و سهم بازار در این مدل کورنات، استفاده کرد [۵].

این مدل را میتوان برای به حساب آوردن دیگر خصیصه‌های صنعت خورشیدی، بسط داد که برخی از این بسطها را توضیح می دهد. به حساب آوردن قیمتهای بدون مدول (تعادل در سیستم) به راهبردهای تعادلی درشرکتهای مدول تاثیر ندارد اما قیمت برق خورشیدی تولید شده را افزایش میدهد. تاثیر اختلاف در قرار گرفتن تحت نور آفتاب(شدت نور خورشید) را می توان به سادگی در این مدل به حساب آورد. در نهایت مدل را میتوان برای تعیین تاثیر تغییر در میزان استفاده از عوامل مختلف تولید بر قیمت مدولهای خورشیدی بسط داد.این بسطها را می توان برای بررسی تاثیر کاهش هزینه تعادل در سیستم، تاثیر تفاوت در میزان شدت نور جذبی، و تاثیر اصلاحات تکنولوژی مانند کاهش مواد خام لازم، بر قیمت تعادلی مدولهای خورشیدی و برق تولیدی از مدولهای خورشیدی استفاده کرد.داده‌های لازم برای کالیبره کردن مدل پایه که توضیح داده می شود را میتوان از منابع در دسترس عموم بدست آورد [۶].

در ادامه ما از این مدل کالیبره شده برای تعیین قیمت پلی‌سیلیکون استفاده میکنیم، که یک ماده خام کلیدی در تولید مدولهای خورشیدی است که قیمت آن در چند سال گذشته رو به کاهش بوده است و تحلیلگران کاهش بیشتر را هم در قیمت این ماده اولیه انتظار دارند. ما از مدل برای ارزیابی تاثیر کاهش قیمت پلی‌سیلیکون بر قیمت مدولهای خورشیدی استفاده می کنیم. شبیهسازیهای جایگزین برای ارزیابی کاهش قیمت پلی‌سیلیکون ، در شرایطی که رقابت بین شرکتها در اثر استاندارسازی مدولها و یا تفاوت بیشتر برق خورشیدی از منابع دیگر تشدید شود، انجام خواهد گرفت [۷].

۲- صنعت مدول خورشیدی

صنعت مدول خورشیدی شامل تعدادی شرکت میشود که در کشورهای مختلف قرار دارند. خروجی شرکت به صورت میزان وات خروجی از مدول خورشیدی تولیدی تعیین می شود. در سال ۲۰۱۱ ، صنعت مدول خورشیدی ، 28000 MW برق از مدول خورشیدی تولید کرده است. برخلاف مشاهدات سطحی مبنی بر اینکه مدولهای خورشیدی ، محصولاتی استاندارد و یکسان هستند، مدولهای خورشیدی تولید شده در شرکتهای مختلف، در بسیاری از جوانب با هم تفاوت دارند. یکی از این تفاوتهای عمده در بازده آنها در تبدیل نور خورشید به برق است. هرچقدر این بازده بیشتر باشد ، به مدول کوچکتری برای تولید میزان برق یکسان نیاز است که این مساله به صورت هزینه‌های کمتر در تجهیزات مورد نیاز در روی بام و یا زمین خود را نشان می دهد. بنابراین بازده بیشتر به اشکال مختلف دارای ارزش است، و ما این مساله را به این صورت که مدولهای خورشیدی از نظر قائم در بازده با یکدیگر تفاوت دارند میبینیم. حتی بعد از تنظیم میزان بازده در مدولها ، همچنان در قیمت هر وات تولید توسط کارخانه‌ها پراکندگی وجود دارد. (شکل ۱)



شکل ۱- قیمت هر وات تولید توسط کارخانه‌ها پراکندگی

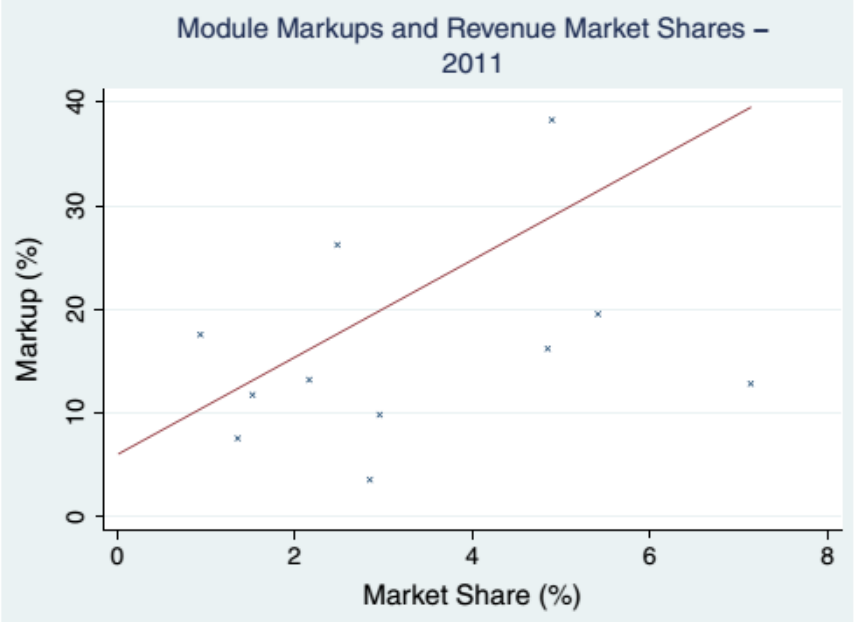
علاوه بر بازده ، مدولهای فروخته شده از طرف شرکتهای مختلف ، دارای تفاوتهای تکنیکی و همچنین تجاری ، مانند میزان مدت تضمین هستند. همچنین ، شرکتها در میزان دسترسی به کانالهای توزیع و بازاریابی ، که اهمیت زیادی در فروش مدولهای خورشیدی دارند ، با یکدیگر متفاوت هستند. این تفاوت در خصوصیات ، به همراه پراکندگی در قیمت تنظیم شده بر اساس بازده همانطور که درشکل(۱) دیده میشود، اینگونه پیشنهاد می کند که مدل مناسب برای شرکتهای این حوزه، مدل رقابت تک قطبی در این صنعت میباشد. با این حال در مقابل مدل رقابت تک‌قطبی معروف دیکسیت واستیگلیتز (۱۹۷۷) ، یک پراکندگی در سود کارخانجات این صنعت وجود دارد. شکل ۲ سودهای شرکتها را درمقابل سهم مازاد نشان میدهد [۸]. همانطور که میتوان از شکل دید، کارخانه‌های بزرگتر ، دارای سود بیشتری هستند، همانطور که مدل کورنات این مساله را بیان می کند، همینطور ، انحرافاتی از روابط خطی وجود دارد. مشاهدات بالا را می توان در سه واقعیت سبکی خلاصه کرد.

۱) پراکندی در قیمتهای تنظیم شده براساس بازده بین شرکتها وجود دارد.

۲) پراکندگی در سود بین شرکتها وجود دارد

۳) شرکتهای بزرگتر دارای سود بیشتری هستند.

بخش بعد ، مدلی را از صنعت مدول خورشیدی توسعه میدهد که با سه مشاهده بالا سازگار است [۹].



شکل ۲- سودهای شرکتها را درمقابل سهم مازاد

۳- مدل

مدل ما ، اصلاح شده‌ی مدل ارائه شده توسط اسمیت و ونبلز (۱۹۸۸) و آتکسون و بورستین(۲۰۰۸) است . ما این مدل را در گامهای مختلفی توسعه دادیم ، و با تعیین میزان تقاضا برای مدول خورشیدی شروع کردیم.

۳-۱- تقاضا

صنعت برق شامل سه بخش که به صورت قائم به هم مربوط هستند، می باشد. بالاتر از همه، شرکتهای برق هستند که برق را به مشتریان نهایی میفروشند. در سطح بعد، تولیدکنندگان برق وجود دارند (که شامل تولیدکنندگان برق خورشیدی هم میشود) که مالک تاسیسات برق هستند و برقی که را که به شرکتهای توزیع میفروشند، تولید میکنند. در سطح پایینی، شرکتهای مربوط به تجهیزات قرار دارند، مانند شرکتهای مدول خورشیدی، که تجهیزاتی را تولید میکنند که توسط تولید کنندگان برق برای تولید برق استفاده میشود. تقاضا برای برق خورشیدی و درنتیجه مدولهای خورشیدی ، اساسا توسط سیاستهای حکومتی تعیین میشود، که این سیاستها در کشورها مختلف با هم تفاوت دارد. در بسیاری از کشورهای اروپایی (آلمان، ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، و چکسلواکی) دولت ، شرکتهای توزیع برق را الزام به خرید برق خورشیدی با قیمت تضمینی میکند. از طرف دیگردر بسیاری از ایالات آمریکا ، تقاضا برای مدولهای خورشیدی ، از استاندارد داراییهای تجدیدپذیر(RPS) ناشی می شود که شرکتهای توزیع برق را اجبار به خرید بخشی از برق خود از منابع تجدید پذیر می کند. شرکتهای توزیع برق ، میزانی از الکتریسه را از منبع خورشیدی انتخاب می کنندکه هزینه‌های آنها را کمینه کند [۱۰].

$$\min_{Q_s,Q_c} P_s Q_s + P_c Q_c$$

$$s.t. \quad \left(Q_s^{\frac{\eta-1}{\eta}} + Q_c^{\frac{\eta-1}{\eta}}\right)^{\frac{\eta}{\eta-1}} = Q. \qquad (۱)$$

در اینجا Q_S ، مقدار برقی است که توزیع کننده از تولید کننده برق خریداری میکند، Q_c میزان برقی است که آنها از منابع غیر خورشیدی خریداری میکنند، Q ، کل برقی است که توزیع کننده از تولید کننده خریداری میکند، P_s ، قیمت برق خورشیدی است، P_c ، قیمت برق ناشی از منابع دیگر است. η ، میزان ارتجاعی بودن ناشی از تعویض برق خورشیدی با برق ناشی از منابع دیگر است. راه حل این مساله تقاضا را به صورت زیر تعیین میکند:

$$Q_s = Q\left(\frac{P_s}{P}\right)^{-\eta} \quad (۲)$$

در اینجا P شاخص قیمت کل برای برق است که توسط معادله $P = (P_s^{1-\eta} + P_c^{1-\eta})^{1/(1-\eta)}$ بیان شده است. بنابراین اگر قیمت برق خورشیدی ، به نسبت شاخص قیمت برق کل (P_s/P) کاهش پیدا کند، توزیع کننده از منابع رایج دوری کرده و به سمت منابع خورشیدی روی می‌آورد.

تولید کنندگان برق خورشیدی ، که سطح دوم را در صنعت برق دارند، میتوانند خانه‌های شخصی باشند که صفحات خورشیدی را بر سقف خانه‌هایشان قرار داده‌اند و یا شرکتهایی باشند که برق خورشیدی را از تعداد زیادی از این خانه‌ها خریداری میکنند و به توزیع کننده میفروشند. ما این را به صورت بخش رقابتی مدل میکنیم، و شرکتها از این بخش هیچ سودی نمیبرند. هر تولید کننده برق خورشیدی، این مدولهای خورشیدی را خریداری میکند، که ما آن را به صورت محصول متایز مدل میکنیم، و از این مدولها برای تولید برق استفاده میکند. همانطرو که بیان شد، شرکتها از نظر قائم بدلیل تفاوت در بازده مدولهایی که میفروشند، متمایز هستند. برای در نظر گرفتن این تمایز، ما واحداهای تنظیم شده براساس بازده را مدولهای خورشیدی استفاده شده توسط تولید کنندگان برق، در نظر گرفته‌ایم. برای این کار از تابع تولید برای تولیدکنندگان برق خورشیدی استفاده کرده‌ایم [۹ و ۱۰].

$$Q_s = \left(\sum_{j=1}^{N} \left(e_j q_j\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (۳)$$

در اینجا qj ، تعداد مدولها از تولیدکننده j است ، ej بازده مدولهای تولیدی توسط تولیدگننده j است، و ρ میزان ارتجاعی بودن، جایگزینی بین انواع مختلف مدولها را نشان می دهد. ما این فرض معقول را انجام میدهیم که $\rho > \eta > 1$ است ، برای مثال ارتجاعیت جایگزینی بین برق خورشیدی و برق تولید شده از منبع دیگر کمتر از ارتجاعیت جایگزینی بین انواع مختلف مدولها است. راه حل برای تولیدکنندگان رقابتی به صورت زیر است.

$$\max_{q_j} P_s Q_s - \sum_{j=0}^{N} p_j q_j$$
$$s.t. \quad Q_s = \left(\sum_{j=1}^{N} \left(e_j q_j\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (۴)$$

این مقدار تقاضا برای شرکت مدولهای شرکت j را به صورت زیر نشان میدهد:

$$q_j e_j = Q_s\left(\frac{p_j/e_j}{P_m}\right)^{-\rho} = Q\left(\frac{P_s}{P}\right)^{-\eta}\left(\frac{p_j/e_j}{P_m}\right)^{-\rho} \quad (۵)$$

در اینجا Pm بازده تنظیم شده شاخص قیمت کل برای مدولها است که توسط معادله زیر داده می شود:

$$P_m = \left(\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{p_i}{e_i}\right)^{1-\rho}\right)^{\frac{1}{1-\rho}} \quad (۶)$$

بنابراین میزان تقاضا برای مدولهای شرکت j بستگی به قیمت مدولهای این شرکت نسبت به قیمت دیگر شرکتها ، (pj/ej)/pm ، و همچنین به میزان قیمت برق خورشیدی نسبت به برق تولیده از منابع دیگر ،(Ps/p) دارد. در شرایط رقابت کامل، میزان سود، صفر خواهد شد و بنابراین قیمت برق خورشیدی به صورت زیر خواهد بود:

$$P_s = P_m \quad (۷)$$

$$q_j e_j = Q\left(\frac{P_s}{P}\right)^{-\eta}\left(\frac{p_j/e_j}{P_s}\right)^{-\rho} \quad (۸)$$

با تعیین میزان تقاضا برای تولید کنندگان مختلف ما به مساله تعیین قیمت بهینه از روی تابع تقاضا برای هر کدام از تولیدکنندگان میپردازیم.

۳-۲- تساوی

ما فرض میکنیم که شرکتهای مدولهای خورشیدی در رقابت کورنات شرکت داشته باشند. هر شرکت خورشیدی مقدار P را به عنوان شاخص قیمت برای برق برای خود درنظر میگیرد. اما شرکت تاثیر تصمیم خود را بر شاخص قیمت مدول خورشیدی Pm و قیمت برق خورشیدی Ps میبیند. فرض ما این است که شرکتهای مدول دارای هزینه حاشیه‌ای ثابت برای تولیدات هستند و هزینه حاشیه‌ای شرکت j را با cj نشان میدهیم. مساله به صورت زیر برای شرکت j در می‌آید [۸ و ۱۰]:

$$s.t \quad q_j e_j = Q\left(\frac{P_s}{P}\right)^{-\eta}\left(\frac{p_j/e_j}{P_s}\right)^{-\rho}, \qquad (۹)$$

$$P_s = \left(\sum_{i=1}^{N}(p_i/e_i)^{1-\rho}\right)^{\frac{1}{1-\rho}}.$$

حل مساله بالا ، نسبت قیمت را به هزینه به صورت زیر به ما میدهد:

$$\frac{p_j}{c_j} = \frac{1}{1-\frac{s_j}{\eta}-\frac{1-s_j}{\rho}}, \qquad (۱۰)$$

در اینجا $s_j = \frac{p_j q_j}{\sum_i p_j q_j}$ میزان سهم بازار شرکت j است . معادله هفت را میتوان برای بدست آوردن سود بازنویسی کرد:

$$\frac{p_j - c_j}{p_j} = \frac{s_j}{\eta} + \frac{1-s_j}{\rho}. \qquad (۱۱)$$

علاوه براین ، با استفاده از معادله ۳ ، میتوان سهم در بازار را به صورت زیر نوشت:

$$s_j = \frac{p_j q_j}{\sum_{i=1}^{N} p_i q_i} = \frac{p_j \frac{1}{e_j} Q_s\left(\frac{p_j/e_j}{P_s}\right)^{-\rho}}{\sum_{i=1}^{N} p_i \frac{1}{e_i} Q_s\left(\frac{p_i/e_i}{P_s}\right)^{-\rho}} = \frac{\left(p_j/e_j\right)^{1-\rho}}{\sum_{i=1}^{N}(p_i/e_i)^{1-\rho}}. \qquad (۱۲)$$

این مدل با مشاهدات درمورد رقابتی که در بخش ۲ به آن پرداخته شد سازگاری دارد. چون $\rho>1$ است ، معادله‌ی ۹ نشان می دهد که شرکتهای بزرگتر (با سهم بازار بیشتر sj) ، قیمت نسبت به بازده کمتری را اعمال می کنند (p/e). با وجود شرط $\rho > \eta$ ، معادله‌ی ۷ نشان میدهد که شرکتهای دارای هزینه حاشیه‌ای نسبت به بازده بیشتر (c/e) ، دارای قیمت نسبت به بازده بیشتری هستند (p/e). بنابرین شرکتها با نسبت قیمت به بازده مختلف با شکل ۱ و واقعیت اول گفته شده سازگاری دارند. معادله ۸ بیان می کند که شرکتها سودهای مختلفی را دریافت می کنند که با واقعیت گفته شده دوم سازگاری دارد. چون $\rho > \eta$ ، معادله ۸ بیان می کند که شرکتهای بزرگتر ، سودهای بیشتری هم بدست می‌آورند که با شکل ۲ و واقعیت سوم سازگاری دارد.

معادله ۷ نشان می دهد که قیمتها می تواند متفاوت از هزینه‌ها باشد. میزان فاکتور، بیشتر بودن قیمت از هزینه، بستگی به سهم در بازار مربوط به شرکت و قابلیتهای ارتجاع η و ρ دارد. برای شرکتهای بزرگتر فاکتور هزینه/قیمت بزرگتر است. همانطور که η فاکتور هزینه/قیمت کاهش پیدا می کند، این به دلیل کاهش تفاوت بین برق خورشیدی وبرق از منبع دیگر و اینکه آنها بیشتر به رقابت مستقیم باهم میپردازند، است. درصورتی که هزینه واحد cj ، بازده ej و قابلیتهای ارتجاعی η و ρ معلوم باشند، محاسبه معادلات به صورت مستقیم انجامپذیر است. با جایگزینی معادله ۹ در معادله ۸ ، می توان یک سیستم غیر خطی با N معادله و N قیمت نامعلوم بدست آورد، و میتوان به این شکل قیمت تعادلی pj را بدست آورد. مدل بالا ابزاری را برای ارزیابی چگونگی تغییر قیمت در واکنش به تغییر در هزینه در دسترس قرار می دهد. در بسیاری از موارد نه تنها قیمت مدولها مورد نظر است بلکه، قیمت

کل سیستم تولید خورشیدی و همینطور قیمت برق تولیدی از آن هم مورد نیاز می‌باشد. در بسط مدل ما نشان می دهیم که چگونه مدل بالا را میتوان برای رسیدن به این خواسته بسط داد. با وجود داده های اضافی ، میتوان از بسط مدل استفاده کرد تا تاثیر تغییر هزینه بر قیمت سیستم نصب شده خورشیدی و بر قیمت برق تولید شده خورشیدی را تعیین کرد[۹].

۴- بسط مدل

مدل پایه‌ای از صنعت صفحات خورشیدی که در بخش تساوی توضیح داده شد را میتوان بسط داد تا دیگر خصیصه‌های این صنعت را بدست آورد.

۵- نتیجه گیری

مدولهای خورشیدی که در این مدل مد نظر هستند، تشکیل دهنده هسته سیستم تولید برق فوتوولتاایک می باشند. علاوه بر هزینه سیستم تولید برق خورشیدی، هزنیه مولفه‌های الکتریکی ضروری برای اتصال سیستم با شبکه برق و هزینه سازه‌های کنترلی برای تعمیر مدولها در بام و یا زمین هم وجود دارند. همچنین هزینه‌های غیر سخت‌افزاری هم وجود دارند «هزینه نرم»- هزینه گرفتن مجوز برای نصب سیستم، هزینه نیروی کار برای نصب سیستم، و غیره.همانطور که هزینه مدولها کاهش می یابد، هزینه‌های دیگر که معمولا به صورت کلی به آنها هزینه باقیمانده سیستم گفته می شود، تبدیل به بخش عمده‌ای از هزینه کل سیستم شده‌اند. (فیلدمن و همکاران ۲۰۱۲ ؛ آبودی ۲۰۱۲). هزینه‌های باقیمانده سیستم را می توان به مدل به شکلی ساده اضافه کرد، این کار با فرض اینکه هزینه کل سیستم خورشیدی، k برابر $k\sum_{i=1}^{N} p_j q_j$ هزینه‌ی مدول است میتوان انجام داد.

مضافا اینکه، علاوه بر خصوصیات مدول خورشیدی، میزان برق تولیدی توسط مدول، به میزان تابش آفتابی که مدول در معرض آن قرار دارد مهم بستگی دارد. این عامل را در صنعت با عنوان insolation میشناسند. این عامل را میتوان با اصلاح تابع تولید در معادله‌ی ۲ در مدل گنجاند.

$$Q_s = h\left(\sum_{j=1}^{N}\left(e_j q_j\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \qquad (۱۳)$$

در اینجا فاکتور تابش h ، میزان نرخ توان را به میزان برق واقعی تولیدی تبدیل می کند. یاداور می شود که میزان فاکتور هزینه‌های باقیمانده سیستم k و میزان فاکتور تابش h در بازارهای مختلف متفاوت است. هزینه‌های باقیمانده سیستم بستگی به هزینه نیروی کار ، مجوز و غیره دارد. برای مثال می توانید به مقاله سیل وهمکاران (۲۰۱۲) رجوع کنید که در آن به هزینه‌های باقیمانده کمتر در آلمان نسبت به ایالات متحده در سال ۲۰۱۰ پرداخته شده است. به طور مشابه فاکتور تابش هم میتواند در بازارهای مختلف متفاوت باشد، در کشورهای آفتابی مانند اسپانیا و یا هند که دارای فاکتور h بالاتری نسبت به کشورهایی مانند دانمارک و آلمان هستند. میتوان مدل بالا را برای مناطق خاصی که در آن میزان تابش و هزینه‌های باقیمانده، در بین تولیدکنندگان مختلف ثابت است ، اعمال کند، با این فرض که هر تولید کننده مدول با هر منطقه به عنوان یک بازار جداگانه نگاه می کند. با این فرضیات، مساله تولیدکنندگان برق در بازار i به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned} &\max_{q_j} P_s Q_s - k^i \sum_{j=0}^{N} p_j q_j \\ &s.t. \quad Q_s = h^i\left(\sum_{j=1}^{N}\left(e_j q_j\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}. \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

۶- مراجع

1- C. Liang, Y. Wang, D. Li, X. Ji, F. Zhang, Z. He, Modeling and simulation of bulk heterojunction polymer solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 127 (2014) 67–86.

2- T. Tromholt, M. Manceau, M. Helgesen, J. E. Carle, F. C. Krebs, Degradation of semiconducting polymers by concentrated sunlight, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 95 (2011) 1308-1320

3- Y. Zhou, J. Pei, Q. Dong, X. Sun, Y. Liu, W. Tian, Donor- Acceptor Molecule as the Acceptor for Polymer-Based Bulk Heterojunction Solar Cells, J. Phys. Chem. C, 113 (2009) 7882- 78809

4- A. Mahmoudloo , S. Ahmadi , Influence of the temperature on the charge transport and recombination profile in organic bulk heterojunction solar cells: a drift-diffusion study, J. Applide Physics A,119(4), (2015) 1523-1529.

5- D. Rezzonico, B. Perucco, E. Knapp, R. Hausermann, N. A. Reinke, F. Muller, B. Ruhstaller, Numerical analysis of exciton dynamics in organic light-emitting devices and solar cells, J. of Photonics for Energy, 1 (2011) 011005-1.

6- J. D. Kotlarski, L. J. A. Koster, P. W. M. Blom, M. Lenes, and L. H. Slooff, Combined optical and electrical modeling of polymer:fullerene bulk heterojunction solar cells, J. Appl. Phys. 103 (2008) 084502.

7- A. H. Fallahpour, A. Gagliardi, F. Santoni, D. Gentilini, A. Zampetti, M. Auf der Maur, and A. Di Carlo Modeling and simulation of energetically disordered organic solar cells, J. Appl. Phys, 103(2014) 184502.

8- R. Yahyazadeh, Z. Hashempour, Effect of Hyrostatic pressure on optical Absorption coeffivient of InGaN/GaN of Multiple Quantum well solar cells, Journal of optoelectronical Nano structures,6.2 (2021) 1-22

9- L. J. A. Koster, E. C. P. Smits, V. D. Mihailetchi, P. W. M. Blom, Device model for the operation of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells, Phys. Rev. B, 72 (2005) 085205.

10-J. Nelson, J. J. Kwiatkowski, J. Kirkpatrick, and J. M. Frost, Modeling charge transport in organic photovoltaic materials, Acc. Chem. Res., 42 (2009) 1768.