

نام درس

تحلیل سیستم‌های انرژی

پروژه پایانی

تحلیل چرخه‌ی عمر سیستم‌های فتوولتائیک

دانشجویان:

بهروز مهدی زاده خرمی

پویا بیگ‌حیدری

استاد:

دکتر عباس رجبی

فهرست مطالب

۳.....	مقدمه
۴.....	مفاهیم کلی تحلیل چرخه‌ی عمر
۵.....	انواع نیروگاه‌های خورشیدی
۶.....	تعریف هدف و محدوده
۸.....	چارچوب کلی پروژه
۱۰.....	تولید پنل فتوولتائیک
۱۱.....	BOS
۱۵.....	حمل و نقل و بسته‌بندی
۱۶.....	بهره‌برداری و نگهداری
۱۷.....	برچیدن و دفع زباله‌ها
۱۸.....	موجودی چرخه‌ی عمر
۲۴.....	EPBT
۲۵.....	ارزیابی اثرات
۳۲.....	نتیجه‌گیری
۳۴.....	منابع

(۲) مقدمه

زندگی مدرن باعث بهبود کیفیت زندگی شده و انرژی الکتریکی را به نیاز اساسی همه‌ی افراد تبدیل کرده است، هرچند که همه‌ی افراد در کشورهای در حال توسعه و یا جهان سوم نمی‌توانند در خانه‌های خود اتصال برق داشته باشند. بین سال‌های ۱۹۸۵ و ۲۰۲۰، تولید انرژی الکتریکی جهان از کمتر از ۱۰۰۰۰ به بیش از ۲۵۰۰۰ تراوات ساعت افزایش یافت، یعنی بیش از ۲/۵ برابر در عرض ۲۵ سال، در حالی که تقریباً ۷۰ درصد آن از سوخت‌های فسیلی (یعنی زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت) منشاء می‌گیرد [1]. همان‌طور که ذکر شد برق امروزی به شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته است که سهم زیادی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه افزایش گرمایش جهانی دارد. واقعیت دیگر این است که منبع سوخت‌های فسیلی در حدود ۵۰ سال آینده کاهش می‌یابد [2]. این وضعیت ناگوار دانشمندان را به جستجوی منابع انرژی جدید و تجدیدپذیر سوق داده است. انرژی تجدیدپذیر نوعی انرژی است که از یک منبع پیوسته و تکرارشونده در طبیعت/محیط تولید می‌شود. تولید انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به همان میزان استفاده از آن‌ها باشد. انرژی تجدیدپذیر می‌تواند از هوا، آب، زمین و خورشید باشد. یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر توسط خورشید و منبع نامحدود نور تابیده‌شده از آن تامین می‌شود. استفاده از اشعه‌ی خورشید برای گرمایش توسط رومیان در حدود قرن اول تا چهارم انجام شده است [3]. ادموند بکرل در سال ۱۸۳۹ به اثر فتوولتائیک (PV) پی برد، اما سال ۱۹۵۴ به عنوان زمان تولد فناوری فتوولتائیک در نظر گرفته شد، زیرا در آن سال داریل چاپین، جرال پیرسون و کالوین فولر یک سلول فتوولتائیک از سیلیکون ساختند و به عنوان اولین سلول خورشیدی که توانایی تبدیل اشعه‌ی خورشید به الکتریسیته را دارد ثبت کردند و از زمان این اختراع، کاربرد سیستم PV به شدت افزایش یافته است [4][3]. هر روز خورشید انرژی عظیمی را برای تمام موجودات زنده‌ی روی زمین ارسال می‌کند و انرژی تولیدی خورشید در یک ساعت می‌تواند انرژی کافی برای یک سال را تامین نماید. اثر فتوولتائیک تبدیل انرژی برداشت‌شده از خورشید به برق مستقیم است. این نوع انرژی تجدیدپذیر جایگزین جذابی برای جایگزینی سوخت فسیلی است زیرا ایمن تر، بدون آلودگی، قابل اعتمادتر، بدون تعمیر و نگهداری و عمر طولانی حدود ۲۰ تا ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود. اثر فتوولتائیک تبدیل انرژی برداشت‌شده از خورشید به برق به طور مستقیم است. سیستم PV را می‌توان در هر جایی که نور خورشید به آن برسد نصب کرد و این برای کشوری با نور خورشید فراوان، یک منبع انرژی عالی است. با این حال، سیستم PV یک اشکال نیز دارد. خورشید فقط در روز می‌تابد، بنابراین باتری‌ها برای پشتیبانی از آن موردنیاز هستند اما باتری‌ها در مقایسه با طول عمر PV عمر کوتاهی دارند و منجر به دفن زباله‌های سمی در زمین می‌شوند.

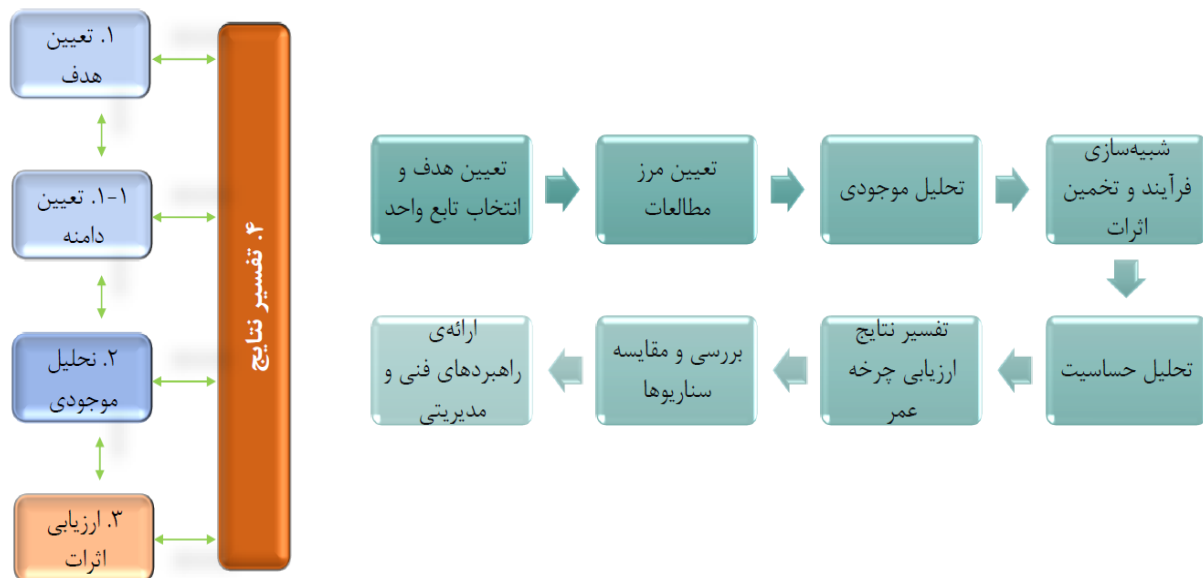
واقعیت این است که همه‌ی پرتوهای خورشید را نمی‌توان به الکتریسیته تبدیل کرد، فقط آن‌هایی که انرژی بیشتری از انرژی bandgap دارند می‌توانند تبدیل شوند. مواد مورد استفاده در ساخت ماژول PV نیز یکی از عوامل موثر بر کارایی سیستم PV است [5]. (bandgap یا شکاف انرژی حداقل مقدار انرژی موردنیاز برای رهاشدن یک الکترون از حالت مقید است. هنگامی که انرژی شکاف نواری برآورده می‌شود، الکترون به حالت آزاد برانگیخته می‌شود و بنابراین می‌تواند در رسانایی شرکت کند) تجزیه و تحلیل چرخه‌ی حیات (LCA) تحلیلی است برای ارزیابی جنبه‌های زیست‌محیطی و اثرات بالقوه‌ی مربوط به یک محصول با بررسی موجودی ورودی‌ها و خروجی‌های کل سیستم، اثرات زیست‌محیطی مربوط به آن ورودی‌ها و خروجی‌ها و در نهایت تعیین پایداری آن محصول. LCA استاندارد ISO 14040 را برای تجزیه و تحلیل محیط‌زیستی در نظر گرفته است. این تجزیه و تحلیل برای کل مدت زمان چرخه‌ی عمر یک محصول به کار گرفته شده و به عنوان گهواره تا گور شناخته می‌شود، از انتخاب مواد تا زمان دفع [6][7]. نیاز است برای سیستم PV به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر نوظهور از طریق یک تجزیه و تحلیل LCA، یک نگاه جامع و کلی نسبت به کل چرخه‌ی عمر آن از جمله اثرات آن بر محیط زیست، امکان سنجی و پایداری حاصل شود. این پژوهش تجزیه و تحلیل LCA سیستم PV را از انتخاب مواد، فرآیند تولید، اجرا، و دفع مورد بحث قرار می‌دهد.

قسمت عمده‌ی مطالب مربوط به گزارش سال ۲۰۱۹ APEC می‌باشد. این گزارش با بررسی شش مورد مطالعاتی، سه نوع سیستم خورشیدی که در کشورهای مالزی و تایلند و اندونزی اجرا شدند را مورد مقایسه قرار می‌دهد.

۳) مفاهیم کلی تحلیل چرخه‌ی عمر

ارزیابی چرخه‌ی حیات (LCA) رویکردی برای پیاده‌سازی سیستم مدیریت زیست‌محیطی است که شامل ارزیابی کمی تأثیر کلی محصول بر محیط‌زیست می‌شود. انرژی موردنیاز و انتشارات در کل چرخه‌ی عمر محصول (شامل ساخت، حمل و نقل، استفاده، دفع و غیره) تخمین زده می‌شود تا بتوان چنین ارزیابی را امکان‌پذیر کرد و نتایج را می‌توان برای ارزیابی‌های زیست‌محیطی مرتبط مورد استفاده قرار داد. با این حال، از آنجایی که چرخه‌ی عمر به طیف وسیعی از متغیرها مرتبط و پیچیده است، درک اهمیت دقیق نتایج دشوار می‌باشد. بر این اساس، تعیین هدف برای ارزیابی بسیار مهم است. یک اپراتور LCA باید تحقیقاتی را اجرا کند که با هدف مطابقت داشته باشد و نتایج را به طور مناسب تفسیر کند. نمای کلی تجزیه و تحلیل چرخه‌ی عمر شامل چهار مرحله‌ی اصلی است که در شکل ۱ به شرح زیر نشان داده شده است: ۱. تعیین هدف و دامنه ۲. تجزیه و تحلیل موجودی ۳. ارزیابی اثرات و ۴. تفسیر نتایج. نتایج تجزیه و تحلیل موجودی به عنوان داده‌های موجودی چرخه عمر (LCI) نامیده می‌شود. دقت شود که بین چهار مرحله‌ی فوق حالت رفت‌و برگشتی و پویا وجود دارد. مثلاً اگر در مرحله‌ی تحلیل موجودی متوجه شوند که امکان دستیابی به داده‌های یک نوع خاص از انتشارات وجود ندارد به مرحله‌ی قبل برمی‌گردند و دامنه‌ی مطالعه را تغییر می‌دهند.

شکل ۱: مراحل ارزیابی چرخه‌ی عمر



LCA برای هر محصول یا خدمتی قابل اجرا است، اما نتایج آن تحت تأثیر اهداف، فرضیات، در دسترس بودن داده‌ها و دقت قرار می‌گیرد. از این رو، تعمیم این روش به سادگی امکان‌پذیر نیست. در نتیجه، اپراتورها و کاربران LCA باید به درستی محدودیت‌های آن و مفروضاتی را که می‌توان از نتایج آن استخراج کرد را درک کنند. ملزومات LCA در ISO 14040 و ISO 14044 استاندارد شده است که جزئیات و نکات اساسی رویکرد را مشخص می‌کند. با انجام LCA، مزایایی مانند ایجاد ساختار

برای داده‌های پیچیده‌ی بزرگ، مقایسه محصول با سایر محصولات جایگزین، و در عین حال تسهیل فرآیند ارزیابی و سنجش حاصل می‌شود. در جامع‌ترین حالت چرخه‌ی عمر فتوولتائیک‌ها از استخراج مواد خام (گهواره) شروع می‌شود و با دفع (گور) یا بازیافت و بازیابی (گهواره) اجزای PV به پایان می‌رسد و به همین دلیل به آن تحلیل گهواره تا گور و یا گهواره تا گهواره نیز می‌گویند.

۴) انواع نیروگاه‌های خورشیدی

در حالت کلی نیروگاه‌های خورشیدی به دو دسته‌ی حرارت خورشید و پدیده‌ی فتوولتائیک تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول، که در آن از حرارت خورشید استفاده می‌شود، در ایران و جهان رایج نمی‌باشد، طوری که حدود ۹۵٪ از نیروگاه‌های کشور بر مبنای پدیده‌ی فتوولتائیک احداث شده‌اند. در یک تقسیم‌بندی کلی سیستم‌های فتوولتائیک به دو دسته‌ی متصل به شبکه (on-grid) و مستقل از شبکه (off-grid) تقسیم می‌شوند. به عنوان نمونه دو دسته بندی دیگر سیستم‌های فتوولتائیک در ادامه تشریح شده‌اند.

دسته‌بندی سیستم‌های فتوولتائیک بر مبنای مکان نصب:

۱) نصب‌شده روی زمین (ground-mounted)

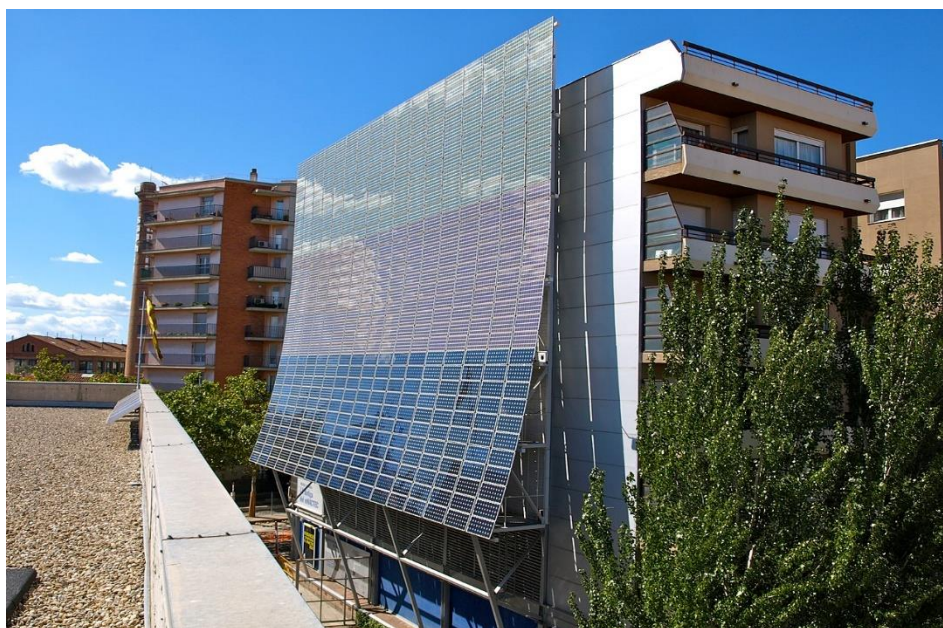
۲) نصب‌شده روی پشت‌بام مسطح (flat-roof mounted)

۳) نصب‌شده روی پشت‌بام شیب‌دار (slanted-roof mounted)

۴) نصب‌شده روی ساختمان‌ها (building integrated system)

در شکل ۷ نمونه ای از building integrated system در بارسلونا مشاهده می‌شود.

شکل ۲: نمونه ای از building integrated system



دقت شود که این یک دسته‌بندی کلی است و مثلاً ground-mounted هم می‌تواند به حالت‌های زمین صاف و شیب‌دار تقسیم شود.

دسته‌بندی سیستم‌های فتوولتائیک بر مبنای مصرف‌کننده‌ی نهایی [8]:

(۱) سیستم‌های مسکونی (Residential systems): بر روی ساختمان‌های جداگانه نصب می‌شوند و تا ۲۰ کیلووات ظرفیت دارند.

(۲) سیستم‌های تجاری (Commercial systems): بر روی ساختمان‌های تجاری، اداری، مدارس، بیمارستان‌ها و خرده‌فروشی‌ها نصب می‌شوند و تا ۱ مگاوات ظرفیت دارند.

(۳) Utility systems: بر روی پشت‌بام و یا زمین نصب شده و ظرفیت ۱ مگاوات و یا بالاتر دارند.

(۴) Off grid applications: به شبکه متصل نیست و در ظرفیت‌های مختلفی طراحی می‌شود.

از بین موارد فوق سیستم‌های مسکونی بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند و بیش از ۴۰٪ PV های نصب شده در این دسته قرار می‌گیرند.

(۵) تعریف هدف و محدوده

در اجرای این پروژه اهداف زیر مدنظر بوده است:

(الف) توسعه‌ی ارزیابی سیستم‌های فتوولتائیک از طریق تجزیه و تحلیل چرخه‌ی عمر (LCA) از گهواره تا گور (from cradle to grave)

(ب) شناسایی سیستم‌های فتوولتائیک با قابلیت اجرا و پایداری و دوام بیشتر بر اساس شاخص ارزیابی تاثیر پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) و بازگشت سرمایه

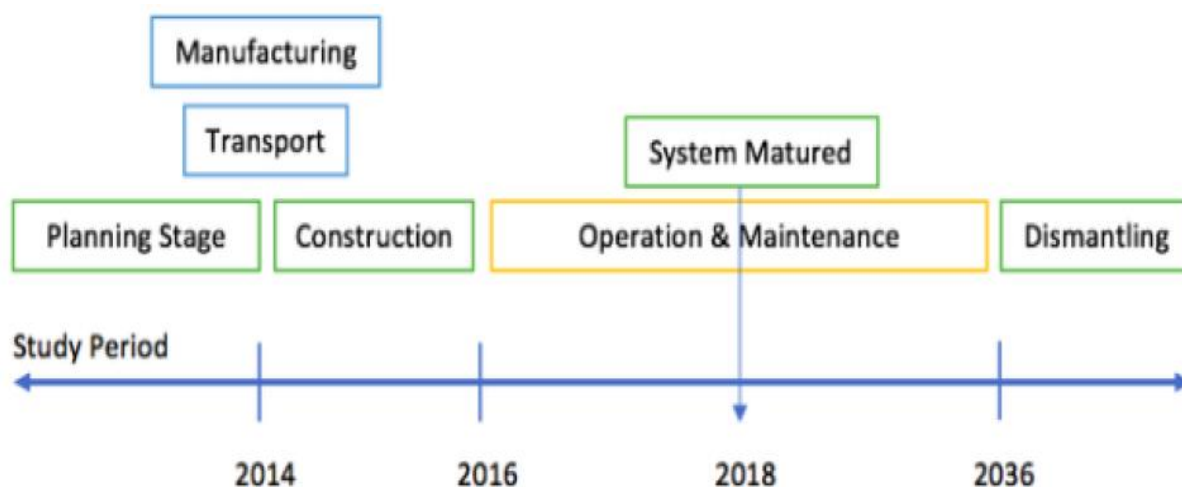
(ج) تعیین و درک تاثیر سیستم‌های PV و مشارکت آن‌ها در حرکت به سمت جامعه‌ی کم‌کربن.

(د) القا و تزریق LCA به عنوان ابزاری برای توسعه‌ی سیاست‌های فتوولتائیک در منطقه‌ی APEC

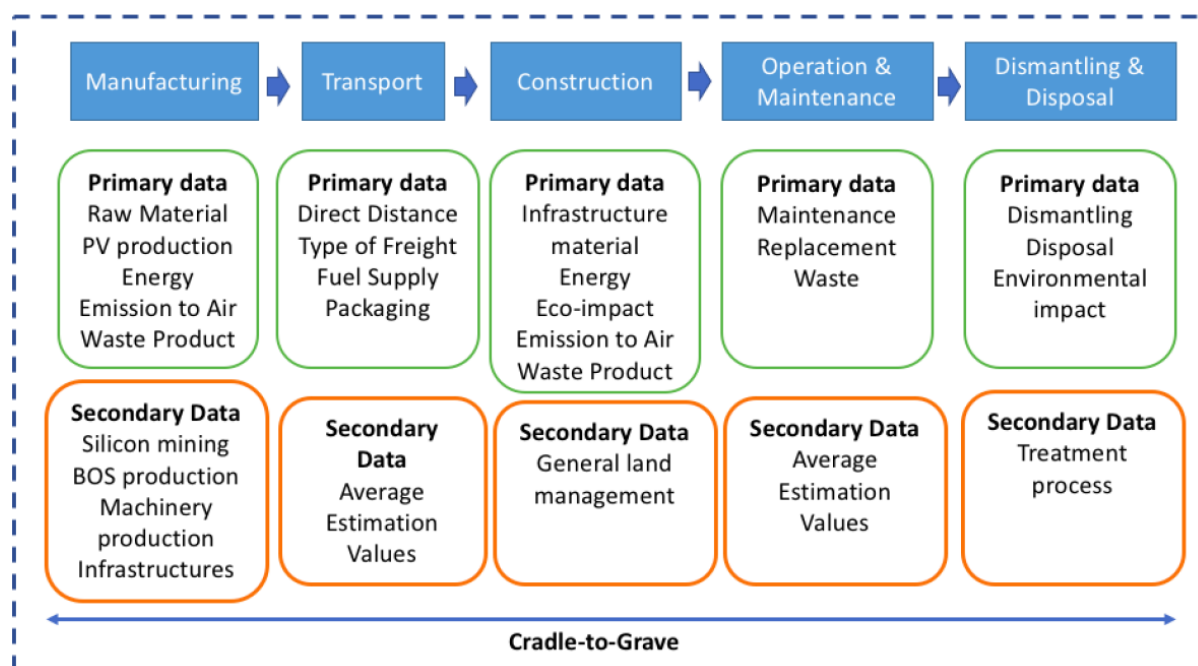
تعریف هدف و محدوده برای درک تأثیر چرخه‌ی حیات سیستم‌های خورشیدی از زمان ساخت تا پایان عمر آن‌ها (از گهواره تا گور) بیان شده است. مطالعه‌ی چرخه عمر باید یک روش مبتنی بر فرآیند باشد. مطالعات موردی پروژه شامل سه سیستم فتوولتائیک است که یک مزرعه‌ی خورشیدی با تولید برق بیش از ۱ مگاوات پیک بوده و بر روی زمین راه اندازی شده است، یک پشت بام خورشیدی با تولید برق در محدوده ۵۰۰ مگاوات پیک تا ۱ مگاوات پیک (1 MWp) و یک سیستم خورشیدی مستقل (stand alone) برای برق رسانی روستایی با تولید برق کمتر از ۱۰۰ کیلووات پیک تا ۵۰۰ کیلووات پیک. لازم به ذکر است که LCA ها معمولاً مواردی مانند تأثیرات اجتماعی یا ملاحظات مالی را مورد توجه قرار نمی‌دهند. سه سیستم PV مورد اشاره بر مبنای شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی و چرخه‌ی انرژی (energy cycle) و با استفاده از نرم‌افزار SIMAPRO و اکسل مورد بررسی قرار گرفتند.

محدوده‌ی زمانی مطالعه هم با فرض عمر ۲۵ سال برای تمام سیستم‌های فتوولتائیک در سه مورد مطالعاتی است. برنامه‌ی زمانی مطالعه‌ی موردی پروژه در شکل ۳ نشان داده شده است. مرز سیستم برای همه‌ی مطالعات موردی Cradle-to-Grave است که شامل ساخت، حمل و نقل، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری و برچیدن و دفع می‌شود. مرز مطالعاتی سیستم از گهواره تا گور در نظر گرفته شده است که شامل تولید (manufacturing)، حمل و نقل (transport)، ساخت‌وساز (construction)، بهره‌برداری و نگهداری (operation&maintenance) و برچیدن و دفع (dismantling&disposal) می‌باشد. (دقت شود که مرحله‌ی استخراج درون فاز manufacturing موردبررسی قرار گرفته شده است. شکل ۴ مرز سیستم را نشان می‌دهد.

شکل ۳: برنامه‌ی زمانی پژوهش انجام‌شده



شکل ۴: مرز سیستم

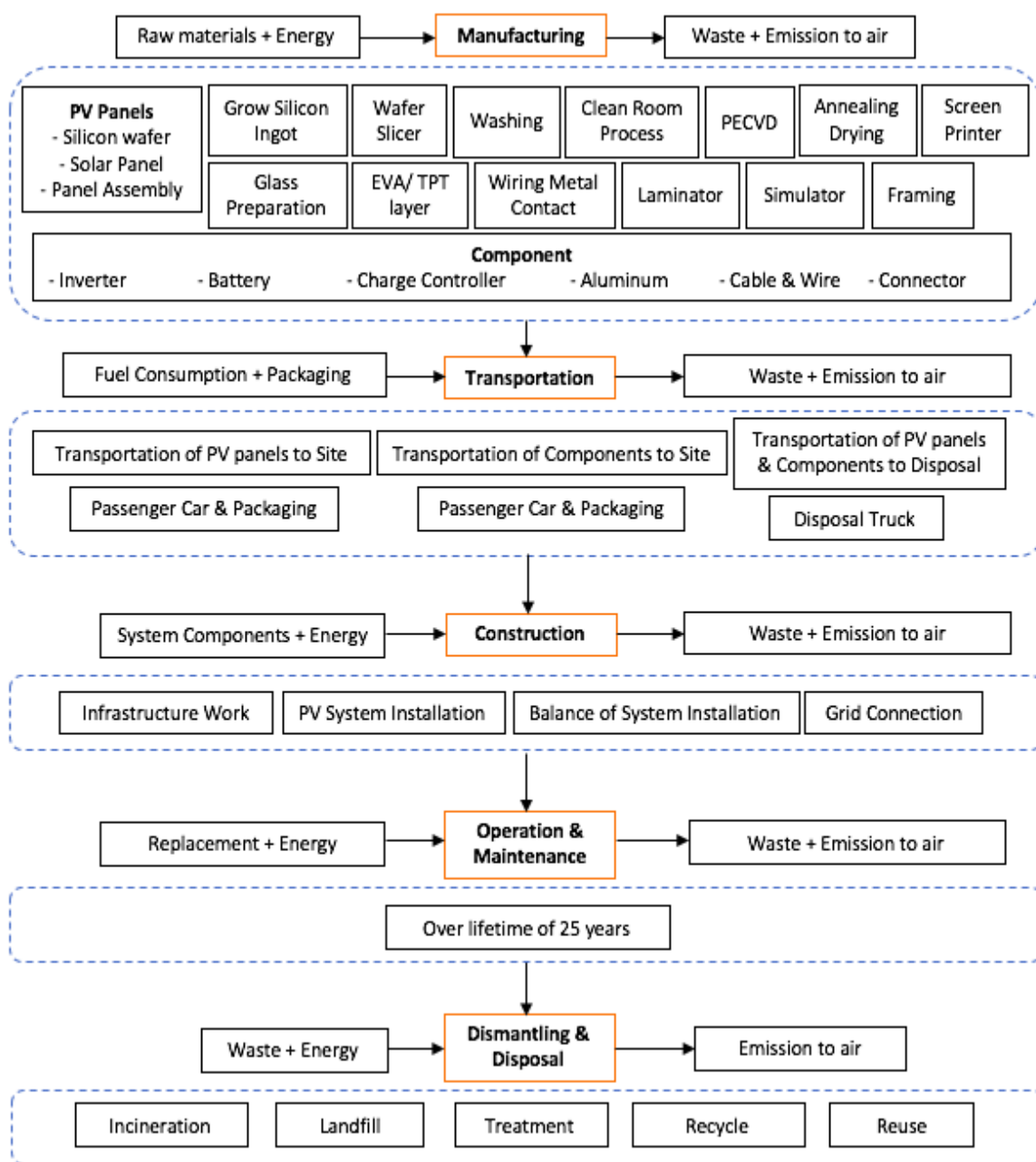


۶) چهارچوب کلی پروژه

در LCA نیاز به یک جریان مرجع عملکردی داریم (standard flow of functional unit) در این پژوهش و بر اساس استانداردهای Iso بر روی تولید برق سه نوع سیستم فتوولتائیک تحت شرایط آب و هوایی مشابه، با اثرات زیست‌محیطی و ردپای کربن مطابق ۲۵ سال طول عمر سیستم بر مبنای تولید توان ۱ کیلووات پیک (1 KWP) نرمالایز می‌شوند. ویژگی‌هایی که در واحد عملکردی کمی‌سازی می‌شوند عبارتند از: تولید توان PV های تک کریستال و پلی کریستال، اثرات محیط‌زیستی، چرخه‌ی اقتصادی، BOS و تعمیر و نگهداری. علاوه بر آن مواردی مانند اقتصاد منطقه، طول عمر ۲۵ سال و حمل و نقل نیز در محدوده‌ی مورد مطالعه لحاظ شدند. داده‌های اولیه (primary data) از بازدید از سایت‌ها و مشاهدات دست‌اول و داده‌های ثانویه (secondary data) از دیتابیس‌های نرم‌افزار سیمپرو، که یک پایگاه بین‌المللی تأییدشده است، به دست آمده است.

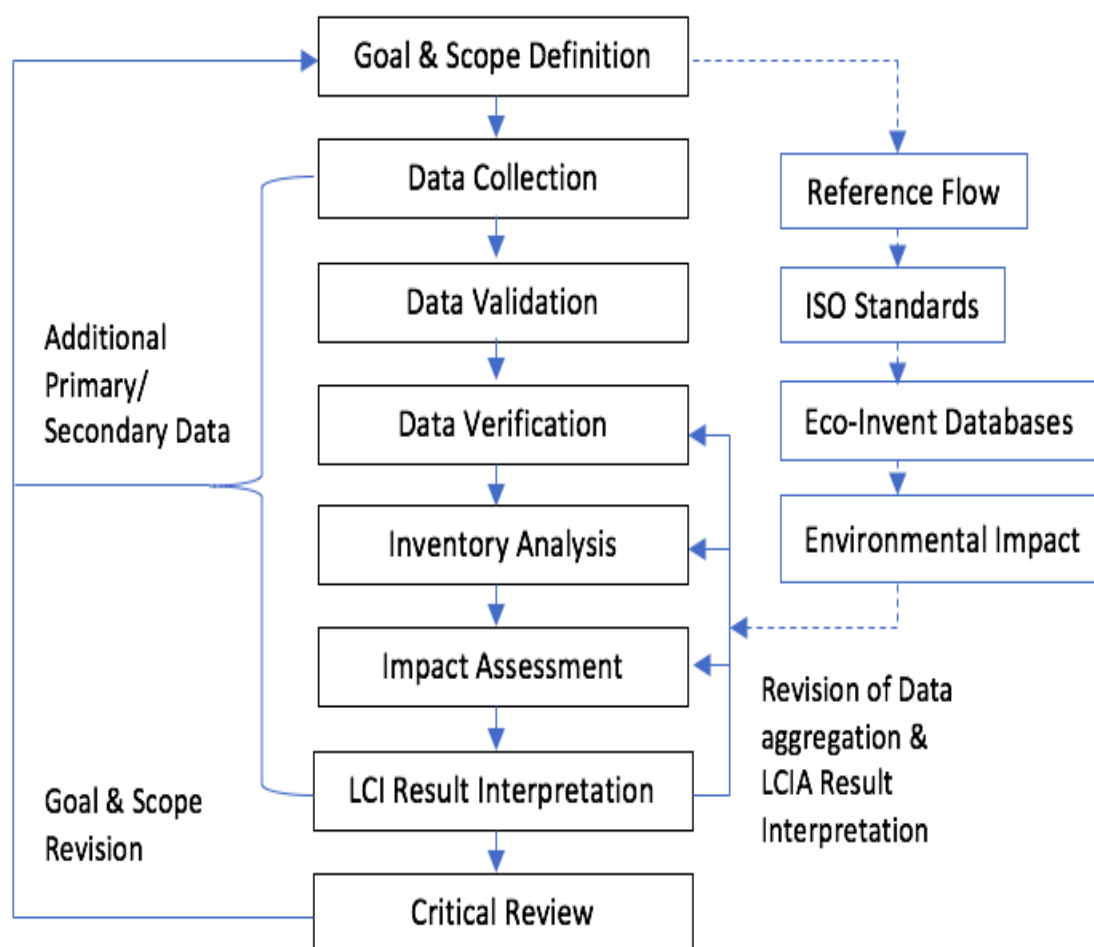
بر اساس مرزهای سیستم، چهارچوب چرخه‌ی عمر کل مطالعه همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده، توسعه یافته است. این چهارچوب تمام جریان فرآیند و محصولات مشترک را برای LCA پوشش می‌دهد. تمام فازها و ورودی‌ها و خروجی‌های مربوط به آن‌ها در شکل مشخص است. فاز تولید شامل جریان‌های مواد خام و مصرف انرژی به عنوان ورودی و جریان‌های خروجی مثل زباله‌های جامد و انتشار به هواست. (در این فاز جمع‌آوری داده‌های اولیه شامل استخراج سیلیکون نیست و از دیتابیس‌های نرم‌افزار استفاده شده است). مرحله‌ی حمل و نقل شامل انتقال تجهیزات و پنل‌ها از محل ساخت به سایت اجرا و همینطور از سایت به محل دفن. در این فاز مصرف سوخت و بسته بندی به عنوان ورودی است و زباله‌های جامد و انتشار به هوا به عنوان خروجی. اجزای سیستم و انرژی به عنوان ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شوند و خروجی هم مانند حالت‌های قبل شامل زباله‌های جامد و انتشار به هواست. فاز ساخت‌وساز شامل مواد و مصالح پایه‌ای و کارهای فلزی و مصرف انرژی توسط ماشین‌آلات و اثرات محیط زیستی ناشی از پاک‌سازی زمین است که اجزای سیستم و انرژی ورودی‌های سیستم را تشکیل می‌دهند و خروجی‌ها هم مانند مراحل قبل می‌باشند. در نهایت در مرحله‌ی برچیدن و دفع که با توجه به شرایط مورد مطالعاتی می‌تواند یکی از حالت‌های سوزاندن و دفن در زمین و بازیافت و استفاده‌ی مجدد باشد زباله‌های جامد و انرژی به عنوان ورودی و انتشار به هوا به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند.

شکل ۵: چهارچوب کلی



فرآیند جمع‌آوری داده‌های اولیه از سایت شامل سه مرحله‌ی (۱) حمل‌ونقل و بسته‌بندی و (۲) Balance of system installation (۳) اجرا و بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری می‌باشد. علاوه بر آن اعتبارسنجی (validation) و تایید (verification) دیتاها از طریق استانداردهای ایزو و دیتابیس Ecoinvent انجام می‌شود. در نهایت نتایج به طور انتقادی توسط کارشناسان و ذینفعان بررسی می‌شود تا کل یافته‌های مطالعه نهایی شود.

شکل ۶: روش‌شناسی مطالعه



(۷) تولد ینل فتوولتائیک

سیلیکون دومین عنصر فراوان در پوسته‌ی زمین است که تقریباً ۲۶٪ از آن را تشکیل می‌دهد. سیلیکون به طور طبیعی به شکل عنصری خود وجود ندارد، بلکه به صورت دی‌اکسیدسیلیکون (SiO_2) در ماسه، سنگ و کوارتز وجود دارد. دی‌اکسید سیلیکون باید به سیلیکون عنصری (Si) با سطوح بسیار کم آلاینده تبدیل شود تا در کاربردهای PV مفید باشد. اولین مرحله در این فرآیند تصفیه، تولید سیلیکون با گرید متالورژیکی است (MG-Si) که دارای خلوص ۹۸ تا ۹۹ درصد می‌باشد. اما این درصد خلوص برای کاربرد سلول خورشیدی کافی نیست. فرآیند خالص‌سازی آنقدر ادامه می‌یابد تا به درصد ۹۹.۹۹۹۹ (six nine pure) برسیم که به سیلیکون با این درصد خلوص بالا solar grade silicon (SoG-Si) می‌گویند. در حال حاضر دو روش مهم برای خالص‌سازی وجود دارد. یک مسیر متالورژیکی و یک مسیر شیمیایی که عبارتند از فرآیند Elkem Solar Silicon process و modified Siemens process که در حال حاضر روش دوم برای تولید SoG-Si های تجاری متداول تر می‌باشد. البته این روش دو ایراد بزرگ هم دارد. قیمت بالای راکتور زیمنس و نیاز این فرآیند به مقدار بالای انرژی.

سلول‌های فتوولتائیک مبتنی بر سیلیکون را می‌توان به سه نوع تک کریستالی (Mono Crystalline)، پلی کریستالی (Poly Crystalline) و نوار سیلیکونی (Silicon Ribbons) تقسیم کرد، اگرچه تمام آن‌ها از یک ماده‌ی

سیلیسی مشابه هستند. به عنوان نمونه فرآیند ساخت PV تک کریستالی به ۵ مرحله تقسیم می‌شود که عبارتند از: رشد شمش، تولید ویفر، کپسوله‌سازی ماژول، مونتاژ پنل و ضایعات تولید.

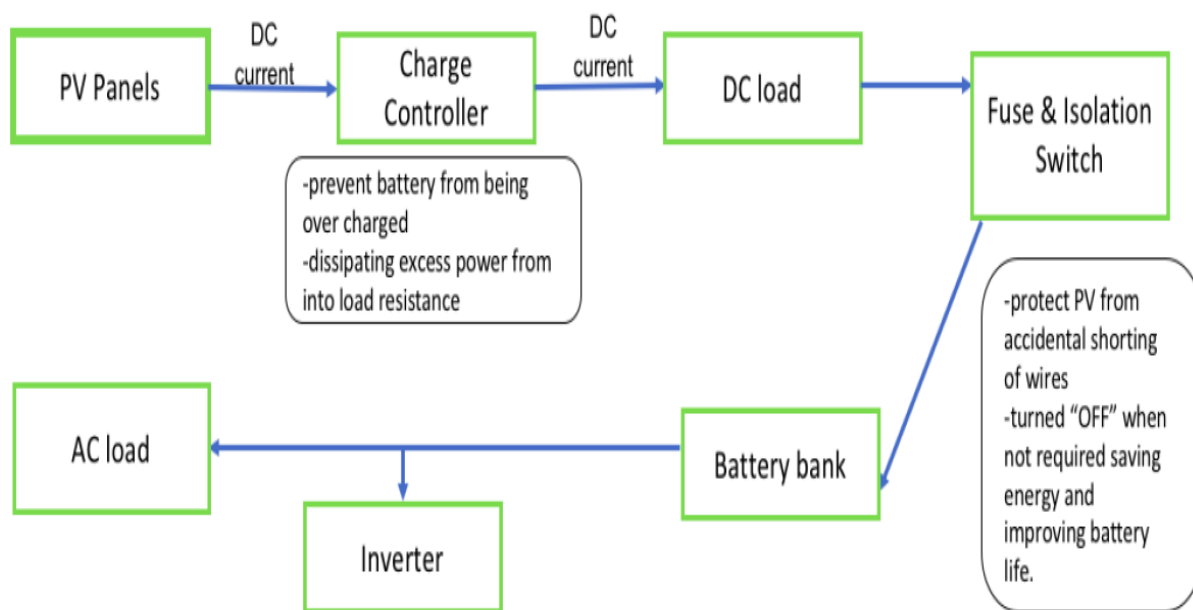
۸) Balance of system (BOS)

BOS عبارت است از ساختار نصب، سیم‌کشی و کابل، اینورتر، باتری و سایر اجزای الکترونیکی که بستگی به نوع سیستم از نظر نصب دارند. در ادامه به عنوان نمونه نمای BOS سه سیستم مورد بحث در تایلند و اندونزی و نیز نمودار تولید توان سالانه‌ی آن‌ها مشاهده می‌شوند.

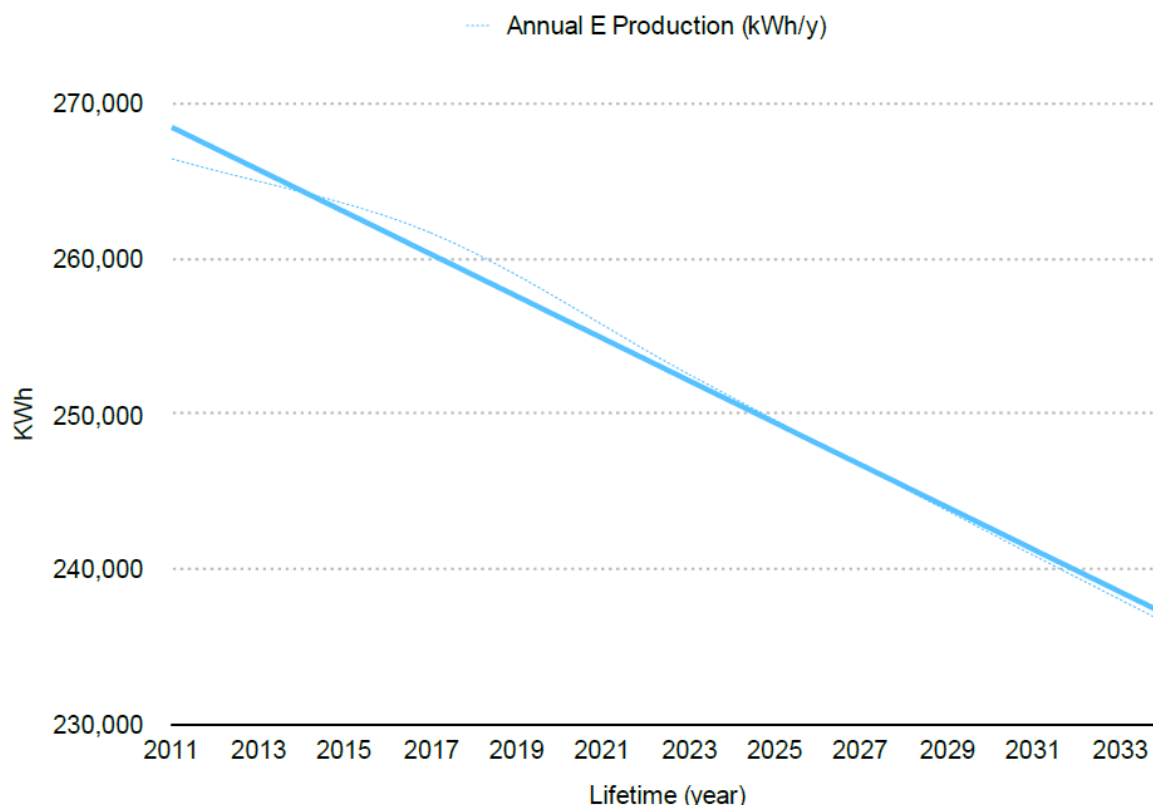
۸-۱- سیستم خورشیدی مستقل (SAPV) Stand Alone System

سیستم PV مستقل می‌باشد که به شبکه‌ی برق متصل نیست. سیستم‌های مستقل معمولاً کوچک بوده و ترجیح داده می‌شود که در مناطق روستایی نصب شوند تا بدون در نظر گرفتن سود اقتصادی، نیاز انرژی را تامین کنند. در این مرحله، اگر تقاضا زیاد باشد، مواردی وجود دارد که با در دسترس بودن فضای زمین و سرمایه گذاری اولیه، به یک مزرعه خورشیدی مستقل تبدیل می‌شود. سیستم‌های مستقل از نظر اندازه و کاربرد بسیار متفاوت هستند، از ساعت‌های مچی یا ماشین حساب گرفته تا ساختمان‌های دورافتاده یا فضاپیماها. اگر قرار باشد معمولاً در این سیستم‌ها از باتری برای ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌شود. در شکل ۷ نمای ساده‌ای از BOS یک Stand Alone System مشاهده می‌شود.

شکل ۷: Standalone PV System BOS



شکل ۸: نمودار تولید انرژی سالانه‌ی سیستم PV مستقل تایلند

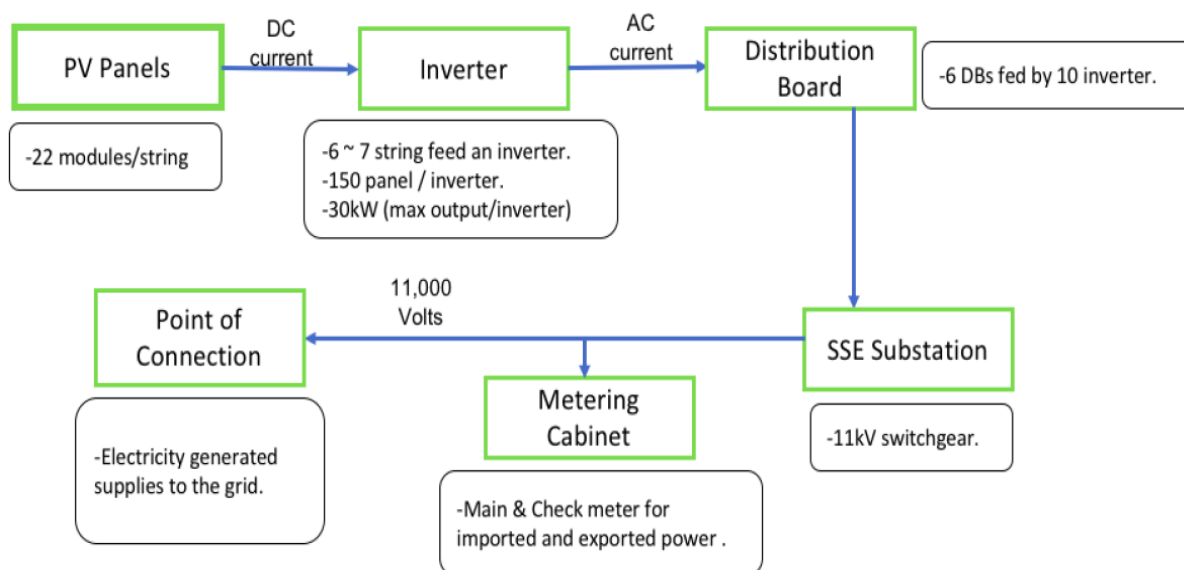


این سایت در سال ۲۰۱۱ نصب شده و با توجه به اطلاعات تولید انرژی در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ تولید توان با ضریب ۰/۳٪ کاهش داشته است. این نسبت می‌تواند نسبت تخریب پنل در سال باشد و تحت تاثیر متوسط تابش خورشید نیز قرار دارد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود تولید سالانه در سال‌های آینده نیز به این میزان کاهش یابد.

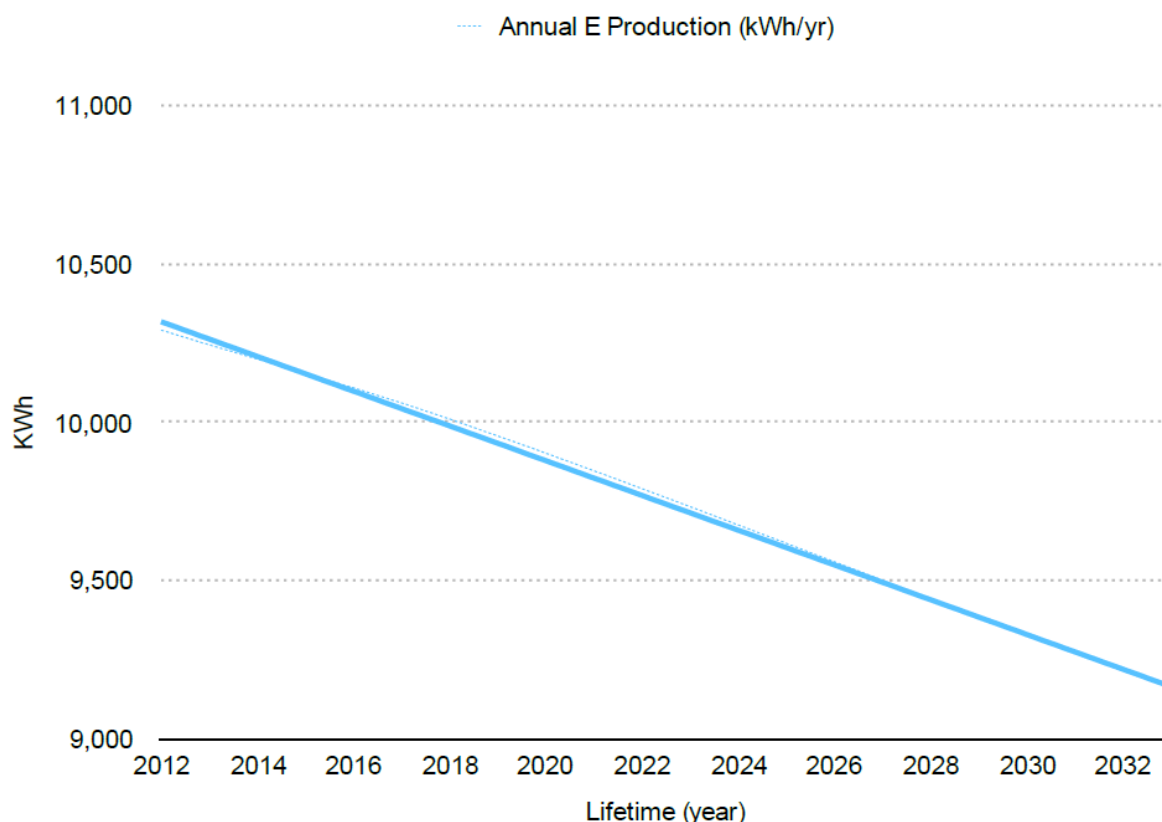
۸-۲- سیستم پشت‌بام خورشیدی (SRPV) Solar Rooftop System

این سیستم به دلیل اشغال فضای بلااستفاده در ساختمان یک سیستم محبوب است. این سیستم اغلب با BIPV (Building Integrated Photovoltaic) ترکیب می‌شود. Rooftop BOS مشابه یک سیستم مستقل معمولی است که به یک ساختمان موجود اضافه می‌شود در حالی که BIPV BOS در طول ساخت‌وساز در نما، پنجره‌ها و سقف ساختمان تعبیه می‌شود و نیز بین BOS این دو تفاوت وجود دارد.

شکل ۹: Rooftop PV System BOS



شکل ۱۰: نمودار تولید انرژی سالانه‌ی سیستم پشت‌بام خورشیدی تابلند

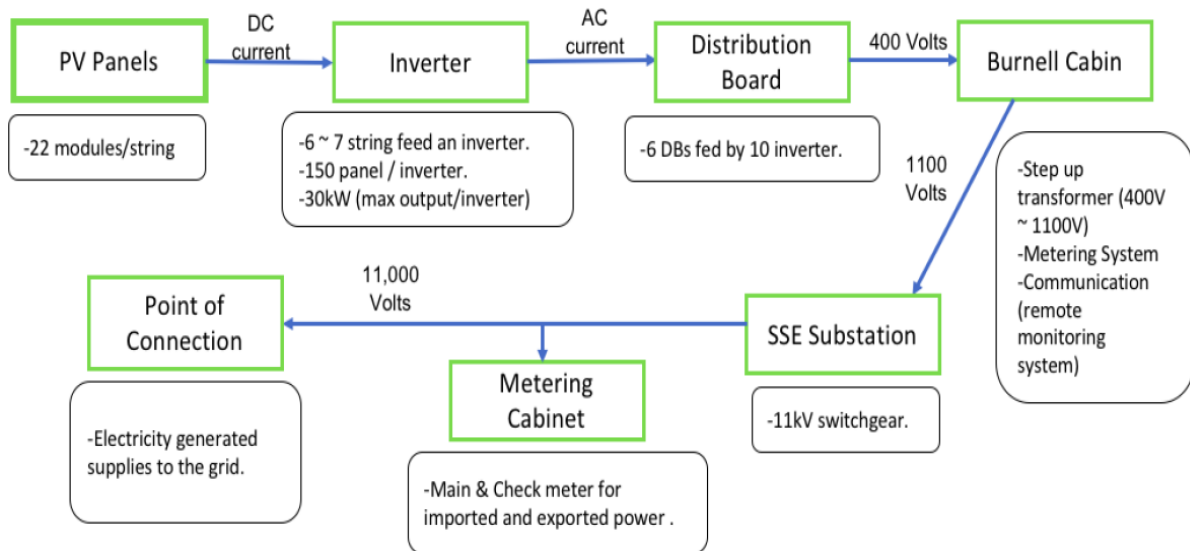


با توجه به داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ ضریب کاهش تولید توان ۴۶٪ می‌باشد.

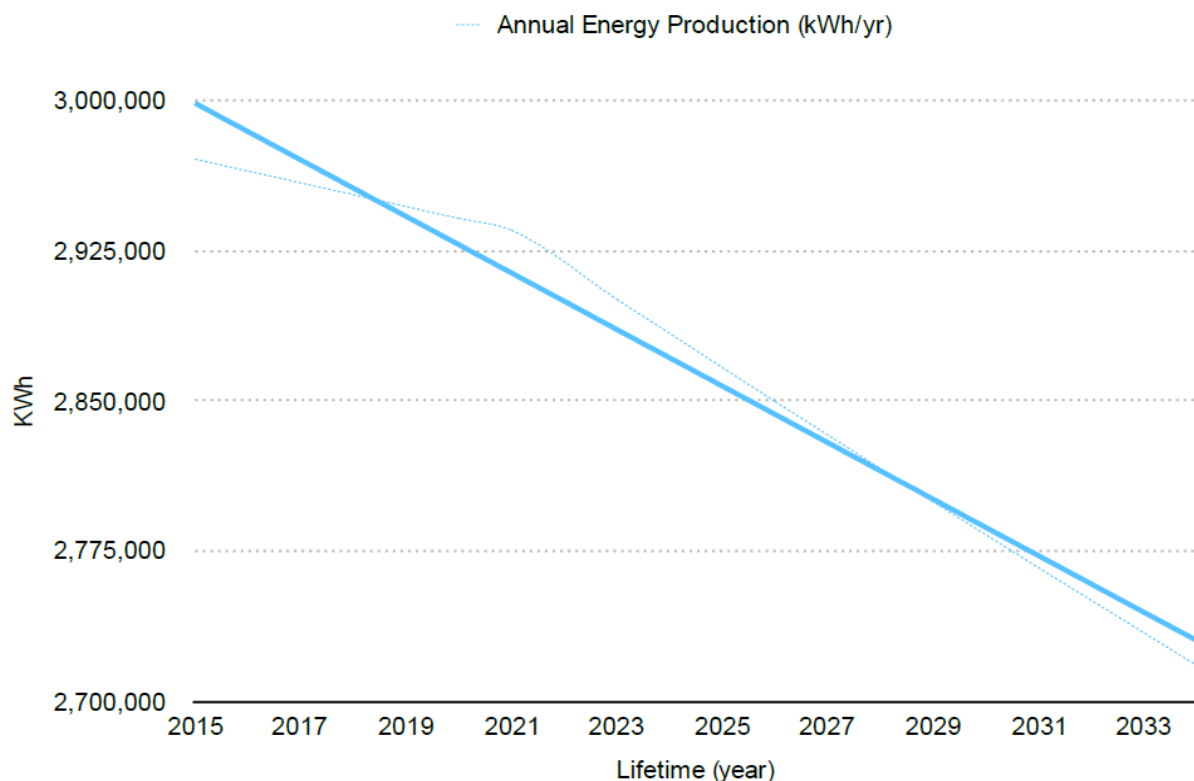
۳-۸- سیستم مزرعه‌ی خورشیدی (SFPV) Solar Farm System

هدف از ساخت یک مزرعه‌ی خورشیدی برداشت انرژی از خورشید با استفاده از تعداد زیادی پنل خورشیدی در مقیاس بزرگ و فروش آن به شبکه‌ی برق برای کسب سود است. این سیستم باعث جذب سرمایه‌گذاران زیادی به صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر شده است.

شکل ۱۱: Solar Farm System BOS



شکل ۱۲: نمودار تولید انرژی سالانه‌ی سیستم مزرعه‌ی خورشیدی اندونزی



با توجه به داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ ضریب کاهش تولید توان ۰/۲٪ می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای سیستم‌های مورد مطالعه

	SAPV1	SAPV2	SRPV1	SRPV2	SFPV1	SFPV2
Country	Malaysia	Thailand	Malaysia	Thailand	Malaysia	Indonesia
The module efficiency (%)	15	15	15	15	15	15
Number of PV panel	12	2808	1320	32	29092	8568
Type of PV panel	Mono*	Poly*	Poly	Poly	Mono	Mono
Performance Ratio	0.75	0.75	0.75	0.7	0.75	0.75
Effective area of PV (m ²)	19.44	4584	2138	51.48	47129	1388
Solar irradiation (kWh/m ² /year)	1573	1772	1685	1772	1573	1826
Degradation per year (%)	0.59	0.3	0.23	0.46	0.59	0.2

* Mono = Monocrystalline PV & Poly = Polycrystalline PV

۹) حمل و نقل و بسته‌بندی

وسایل نقلیه به عنوان یکی از مهمترین منابع آلاینده‌ی هوا و مصرف‌کنندگان انرژی سوخت فسیلی در شهرهای بزرگ محسوب می‌شوند. جهت محاسبه‌ی مقدار انرژی مصرفی و آلاینده‌ی منتشرشده توسط وسایل نقلیه از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Energy consumption} = F * E$$

$$\text{GHG emissions} = F * G$$

F: کل سوخت مصرفی وسیله‌ی نقلیه بر حسب لیتر

E: ضریب انرژی سوخت مصرفی

G: ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای سوخت مصرفی

بسته‌بندی به طور کلی جدا نگه داشته شده و به عنوان ورودی و خروجی مکمل استفاده می‌شود. و با توجه به نوع محصول و بسته‌بندی مورد استفاده و با توجه به ضرایب جدول Danish packaging statistics for 2004 به عنوان ورودی‌ها و خروجی‌های مکمل اضافه می‌شوند.

جدول ۲: Danish packaging statistics for 2004

Product Group/Packaging	Plastic (kg)	Paper (kg)
Packaging product of plastics	0.002	0.008
Other plastic products	0.003	0.007
Flat glass	0.003	0.005
Al, copper, lead, zinc, tin	0.001	
Tools	0.021	0.041
Wire product	-	0.001
Pumps and compressors	0.007	0.007
Furnace and Machinery	0.003	0.005
Electric domestic appliances	0.014	0.021
Insulated wires and cables	-	0.023
Accumulators and batteries	-	0.016
Electronic component	0.014	0.038
Other electrical equipment	0.001	0.006
Other manufactured goods	0.014	0.023
Other fabricated metal products	0.004	0.007
Other chemical products	0.030	0.006

۱۰ بهره‌برداری و نگهداری

ماژول‌های فتوولتائیک به دلیل عملکرد بدون انتشارشان در طول عمر ۲۵ تا ۳۰ سال به خوبی شناخته شده‌اند. ماژول‌ها در داخل دو ماژول شیشه‌ای محصور و مهر و موم شده‌اند و بنابراین حین استفاده از ماژول‌ها هیچ انتشار موردانتظاری وجود ندارد. در سال ۲۰۱۲ NREL گزارش مطالعات بلندمدت قابلیت اطمینان ماژول‌های فتوولتائیک را منتشر کرد که نشان می‌دهد نرخ تخریب پنل‌ها به‌طور پیوسته بهبود پیدا می‌کند (با تولیدکنندگانی که طول عمر بیشتر از ۲۵ سال را برای پنل‌های خود پیشنهاد می‌دهند، هر چند که تعداد بسیار کمی از نیروگاه‌های فتوولتائیک برای چنین مدت طولانی برای تایید این گارانتی وجود داشته‌اند). دانستن قابلیت اطمینان بلندمدت برای صنعت PV بسیار مهم است، چون بر عمر سیستم PV تاثیر گذاشته و ملاحظات مربوط به هزینه را تغییر می‌دهد. اجرای آزمایشی به این نتیجه رسیده است که کاهش و تلفات در حداکثر توان تقریباً به‌طور کامل به دلیل تلفات در جریان اتصال کوتاه است و این تلفات برای پنل‌های تک و پلی کریستالی تقریباً یکسان است و به شدت به فرآیند مورد استفاده در ساخت وابسته است. مراقبت از پنل‌ها در طول عمرشان مربوط به اطمینان از تمیزبودن سطح از آلودگی و اجتناب از قرارگیری در سایه است. به‌علاوه پنل‌های خورشیدی به تدریج در اثر اشعه‌ی ماوراءبنفش، باران، خاک، نوسانات دما، تگرگ و باد آسیب می‌بینند. داده‌های آزمایش‌های طولانی‌مدت نشان می‌دهند که تخریب ماژول‌ها برای ۱۰ سال می‌تواند در محدوده‌ی ۴ تا ۷ درصد باشد که کمتر از تخریب ۱۰ درصدی که در حال حاضر توسط اکثر سازندگان تضمین

شده می‌باشد. مطالعات NREL نرخ تخریب کمتر از ۰.۵٪ در سال را پیشنهاد می‌دهد. برای به‌دست‌آوردن تخمین دقیق از مقدار توان و بنابراین درآمد قابل انتظار هر سال پس از نصب دستورالعمل‌های روش‌شناسی تحلیل چرخه‌ی عمر که توسط IEA PVPS Task منتشر شده امید به زندگی که در مطالعات ارزیابی چرخه‌ی عمر اجزا و سیستم‌های فتوولتائیک را به شرح زیر توصیف می‌کند.

<< ماژول: ۲۵ سال (تک کریستال و پلی کریستال)

<< اینورتر: ۱۵ سال برای سیستم‌های PV کوچک و ۳۰ سال برای نیروگاه‌های بزرگ

<< استراکچر: ۳۰ سال برای نصب روی پشت‌بام و نما و بین ۳۰ تا ۶۰ سال برای نصب روی زمین بر روی تکیه‌گاه‌های فلزی

<< کابل کشی: ۳۰ سال با تعمیر و نگهداری دوره‌ای

<< باتری: ۵ سال با تعویض و تعمیر و در چرخه‌ی باتری

۱۱) برچیدن و دفع زباله‌ها

ارزیابی کامل چرخه‌ی عمر از استخراج مواد خام برای محصول اولیه تا پایان عمر و مرحله‌ی دفع و در صورت لزوم بازیافت ادامه می‌یابد. بازیافت چالش‌هایی را به دلیل لایه‌لایه شدن ماژول‌ها ایجاد می‌کند. ماژول‌های PV که در محل‌های دفن زباله‌های شهری دفن می‌شوند خطر نفوذ فلزات سنگین به خاک اطراف را به دنبال دارند. مانند سایر اقلام چندگانه و مواد مخلوط، جداکردن قطعات به طور ایمن و کارآمد می‌تواند دشوار باشد.

اجزای BOS (اینورتر و ...) و مقدار زیاد شیشه‌های استفاده‌شده در ماژول‌ها بخش زیادی از تأثیرات زیست‌محیطی سیستم‌های PV را تشکیل می‌دهند. فلزات سنگین و مواد آلی موجود در مواد کپسول (capsule material) ممکن است از ماژول‌ها خارج شده و از محدودیت‌های محیط‌زیستی فراتر روند. اگر این ماژول‌ها به‌طور ناخواسته به زباله‌سوزهای شهری ختم شوند، فلزات سنگین به گاز تبدیل شده و کسری از آن‌ها در اتمسفر رها می‌شوند. رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک می‌توانند این رهاسازی را به کمتر از ۰.۵ درصد کاهش دهند.

۱۲) موجودی چرخه‌ی عمر (LCI) Life Cycle Inventory

LCI ورودی‌ها و خروجی‌های مواد و انرژی مربوط به چرخه‌ی عمر را کمی می‌کند. در واقع روش‌شناسی دقیقی است که شامل فهرستی از ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم، اندازه‌گیری شده در مرزهای سیستم و همچنین اثرات بالقوه‌ی مرتبط با این ورودی‌ها و خروجی‌هاست.

انرژی ورودی چرخه‌ی عمر (LCIE) Life Cycle Input Energy

انرژی ورودی را می‌توان به دو دسته‌ی زیر تقسیم کرد:

تقاضای انرژی تجمعی Cumulative Energy Demand

انرژی تعبیه‌شده embedded energy

۱۲-۱- تقاضای انرژی تجمعی (CED) Cumulative Energy Demand

کل انرژی موردنیاز به عنوان انرژی اولیه در طول چرخه‌ی حیات سیستم PV را نشان می‌دهد. انرژی اولیه (primary energy) در این مورد نشان‌دهنده‌ی هر دو حالت تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر هست که در طول چرخه‌ی حیات سیستم موردنیاز می‌باشد. در ادامه نمودارهای مربوط به کل انرژی موردنیاز در سه نوع سیستم PV و شش مورد مطالعاتی مشاهده می‌شوند. انرژی موردنیاز از شش منبع تامین می‌شود که عبارتند از:

<< غیرتجدیدپذیر، فسیلی (Non-renewable, fossil)

<< غیرتجدیدپذیر، هسته‌ای (Non-renewable, nuclear)

<< غیرتجدیدپذیر، زیست‌توده (Non-renewable, biomass)

<< تجدیدپذیر، زیست‌توده (Renewable, biomass)

<< تجدیدپذیر، بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی (Renewable, wind, solar, geothermal)

<< تجدیدپذیر، آبی (Renewable, water)

دسته‌بندی روند پروژه بر مبنای پنج فاز زیر انجام شده است:

<< تولید (photovoltaic manufacturing)

<< حمل‌ونقل و بسته‌بندی (transportation and packaging)

<< نصب BOS (BOS construction)

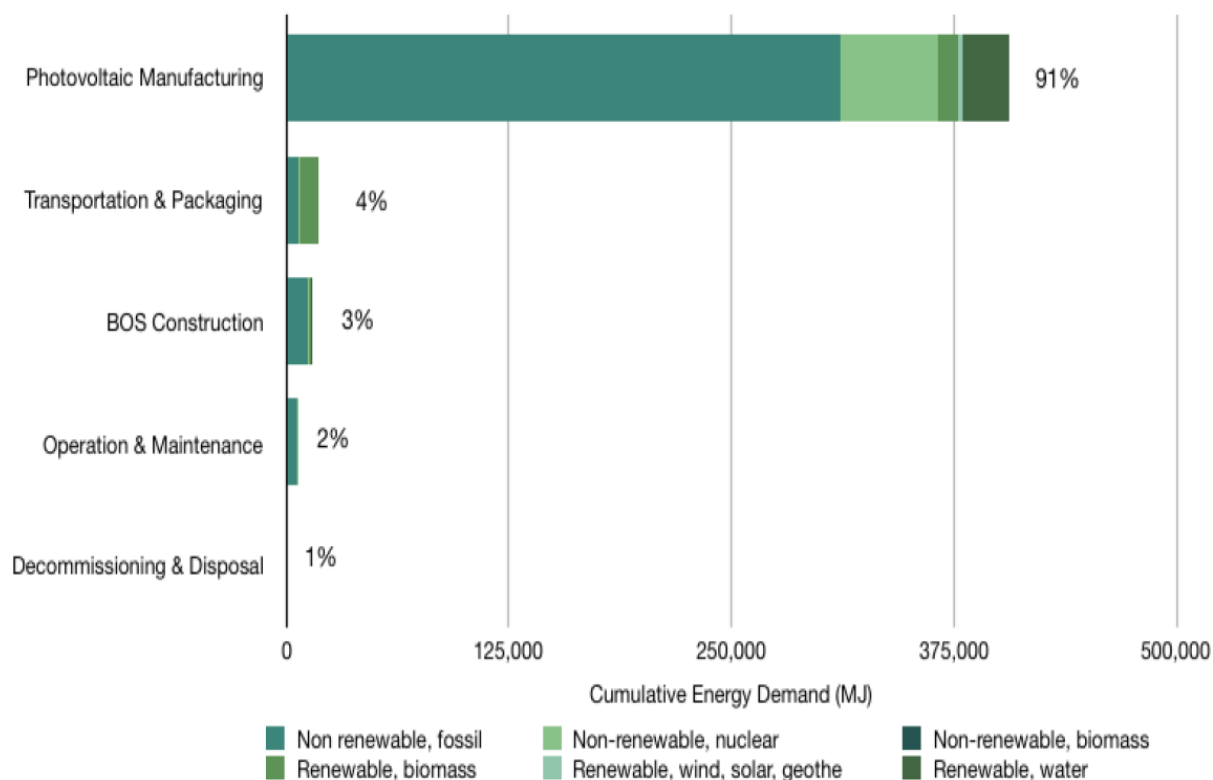
<< بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری (operation and maintenance)

<< برچیدن و دفع ضایعات (decommissioning and disposal)

۱۲-۱-۱- سیستم PV مستقل (SAPV)

<< مورد مطالعاتی اول (مالزی)

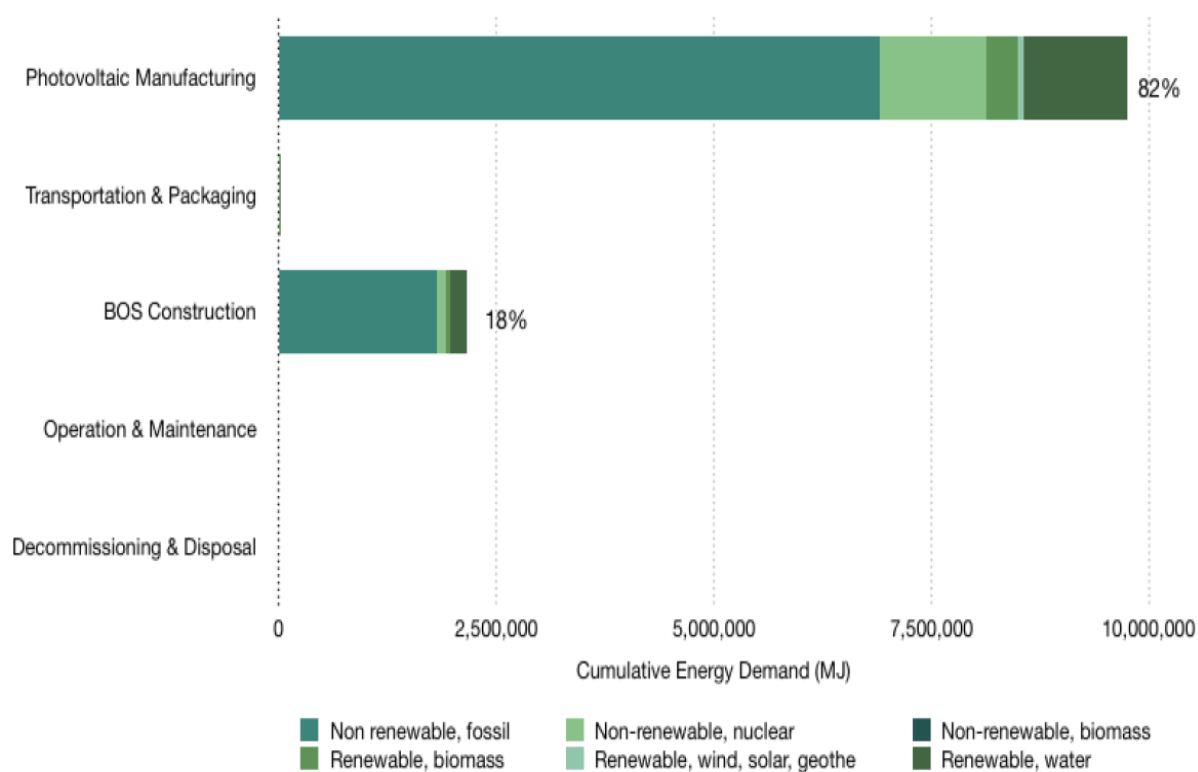
شکل ۱۳: انرژی تجمعی مورد نیاز SAPV مالزی



همانطور که از نمودار مشخص است مرحله‌ی تولید PV ها، به دلیل تعداد زیاد پنل‌ها، با مصرف ۹۱٪ انرژی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است که کل مصرف انرژی در این مورد مطالعاتی ۴۰۵۸۲۷/۲۸ مگاژول می‌باشد.

<< مورد مطالعاتی دوم (تایلند)

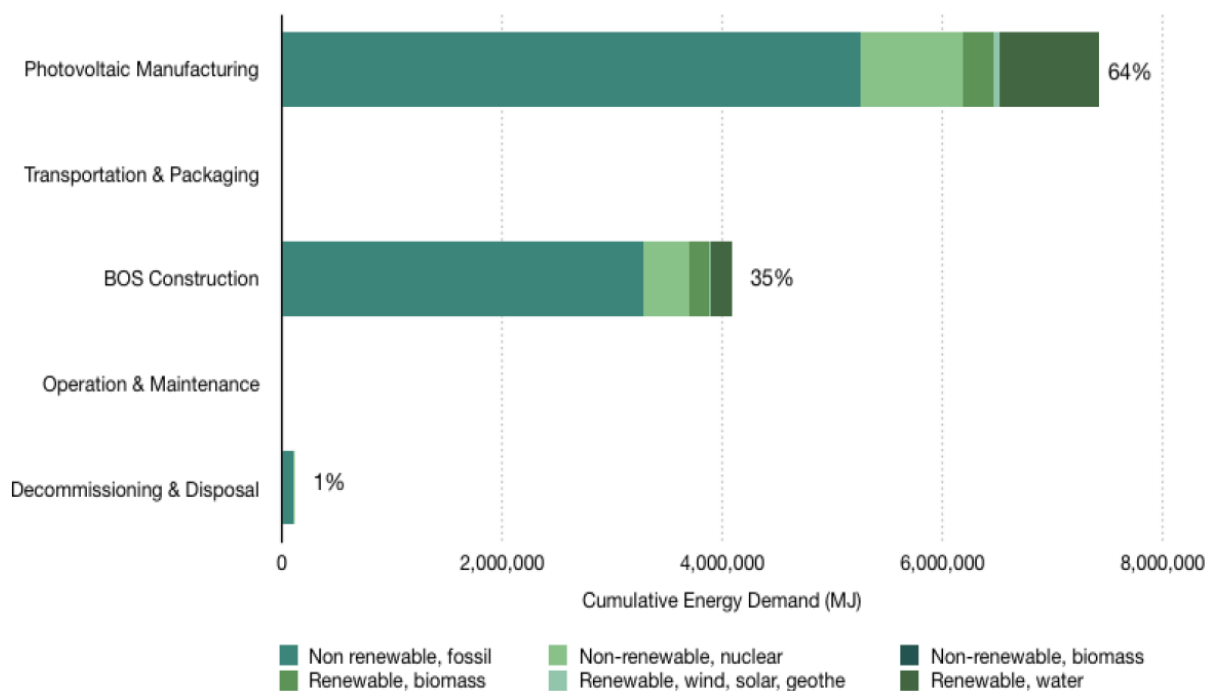
شکل ۱۴: انرژی تجمعی مورد نیاز SAPV تایلند



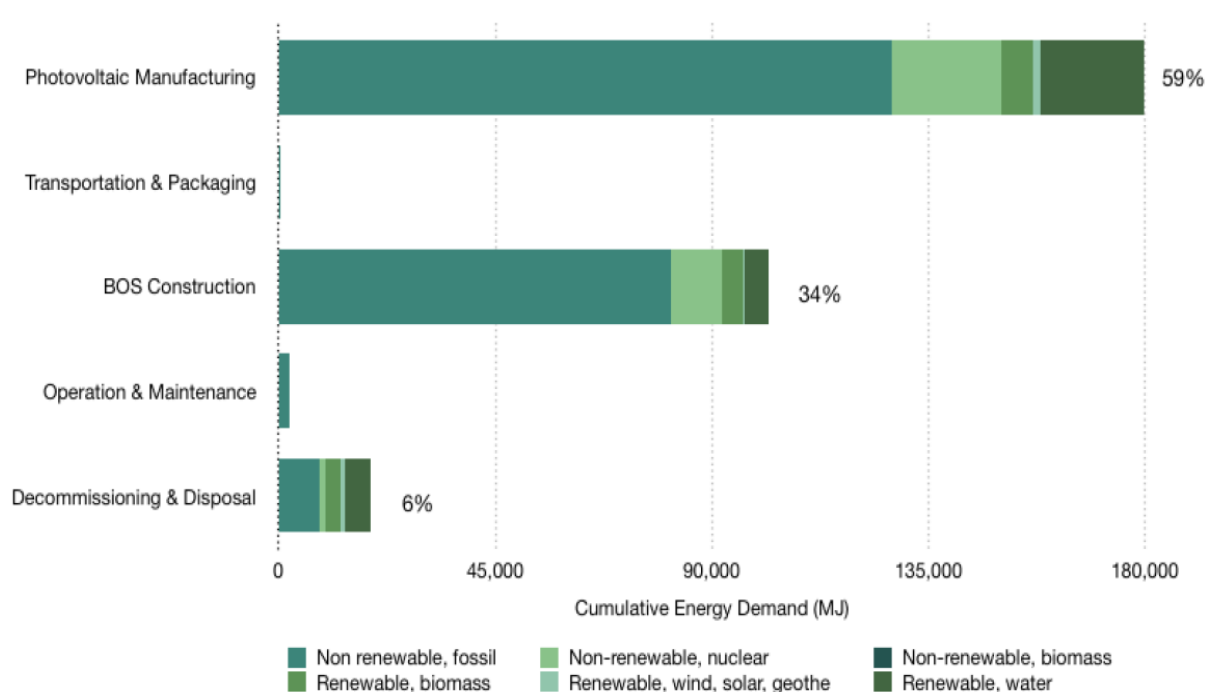
در این مورد هم مرحله‌ی تولید با ۸۲ درصد بیشترین مقدار مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. مرحله‌ی نصب BOS با ۱۸ درصد در رتبه‌ی دوم قرار دارد. دلیل تفاوت زیاد درصد BOS در این دو مورد بزرگتر بودن ساینز نیروگاه تایلند و استفاده‌ی بیشتر از فلزات جهت نصب می‌باشد.

سیستم پشت‌بام خورشیدی (SRPV)

شکل ۱۵: انرژی تجمعی مورد نیاز SRPV مالزی



شکل ۱۶: انرژی تجمعی مورد نیاز SRPV تایلند

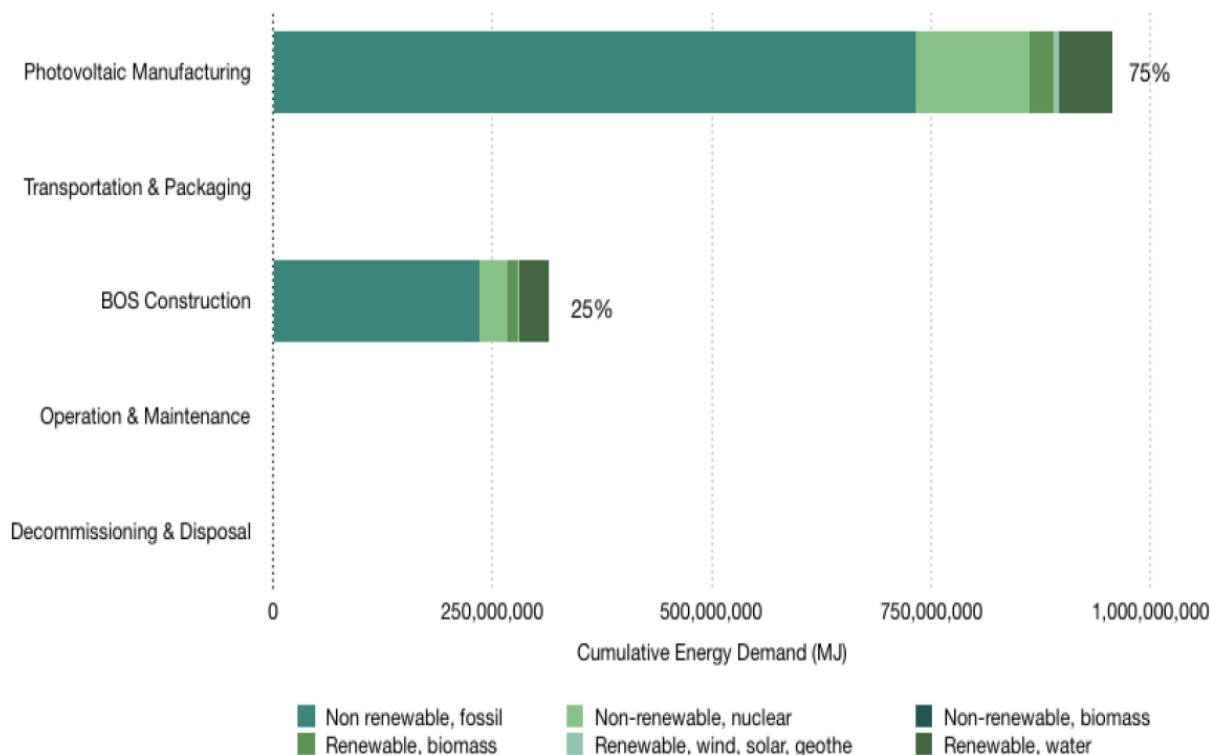


در این سیستم هم بیشترین انرژی مصرفی مربوط به فاز manufacturing می‌باشد که با ۶۴٪ و ۵۹٪ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و فاز BOS construction در رتبه‌ی دوم قرار دارد و میزان انرژی مصرفی در این فاز تقریباً نصف فاز

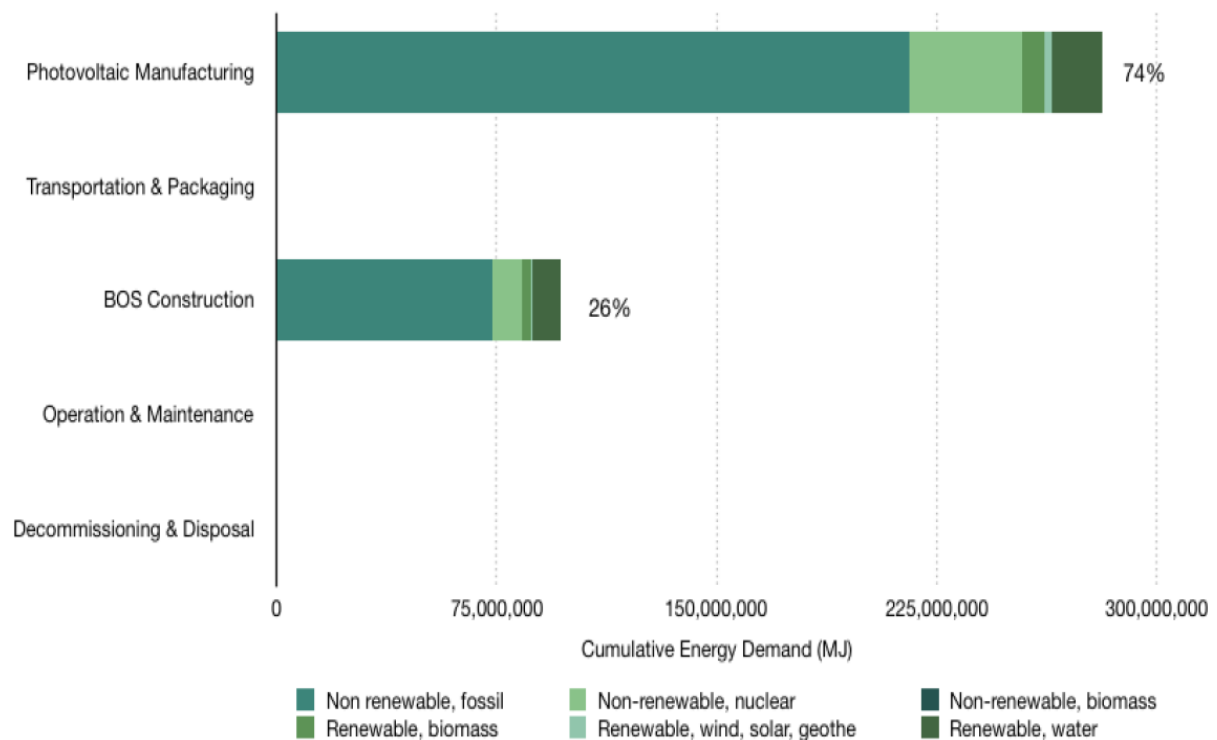
manufacturing می‌باشد. در این سیستم سایز اندازه‌ی نیروگاه مالزی بزرگتر می‌باشد و احتمالاً انتظار آن می‌رود که درصد فاز BOS construction بیشتر از تایلند باشد اما چون پشت بام مورد استفاده در تایلند به صورت شیب‌دار بوده و فلزات بیشتری جهت نصب پنل‌ها مورد نیاز می‌باشد درصد این فاز به مورد مالزی که دارای پشت‌بام مسطح می‌باشد نزدیک شده است.

۱۲-۱-۳- سیستم مزرعه‌ی خورشیدی (SRPV)

شکل ۱۷: انرژی تجمعی مورد نیاز SFPV مالزی



شکل ۱۸: انرژی تجمعی مورد نیاز SFPV مالزی



همانطور که از سه سیستم و شش مورد مطالعاتی فوق مشخص است بیشترین مقدار مصرف انرژی مربوط به فاز manufacturing می‌باشد و پس از آن فاز BOS construction قرار دارد و فاز operation & maintenance کمترین درصد را به خود اختصاص داده است.

۱۲-۲- انرژی تعبیه‌شده Embedded Energy

Embedded Energy مقدار انرژی مربوط به ساخت مواد و محصولاتی است که برای جایگزینی و نگهداری و تعمیر مواد و اجزای سیستم PV در طول عمر مفید سیستم مورد نیاز است و به‌طور مستقیم تحت‌تاثیر عمر سیستم PV قرار دارد. در این پژوهش Embedded Energy مربوط به هر ماده، به انرژی مورد استفاده برای استخراج، پردازش و تصفیه‌ی آن قبل از استفاده در ساخت محصول اشاره دارد. در جدول ۲ مقدار انرژی و انتشارات تعبیه‌شده‌ی مربوط به مواد مختلف مشاهده می‌شود.

جدول ۳: انرژی تعبیه شده (Embedded Energy)

Materials	Embedded Energy	Carbon Coefficient	
	EE (MJ/kg)	EC (kgCO ₂ /kg)	EC (kgCO _{2e} /kg)
Aggregate (general)	0.083	0.0048	0.0052
Aluminum (general)	155	8.24	9.16
Primary Glass	15	0.86	0.91
Silicon	2355	-	-
Lithium	853	5.3	-
Water	0.01	0.001	-
Plastic	80.5	2.73	3.31
Wire	36	2.83	3.02
	MJ/sqm	KgCO ₂ /sqm	
Monocrystalline PV	4750	242	-
Polycrystalline PV	4070	208	-

۱۳) زمان بازپرداخت انرژی (Energy Payback Time)

EPBT زمان موردنیاز برای بازپرداخت (جبران) کل انرژی مصرف‌شده در یک سیستم فتوولتائیک است که بستگی عوامل متعددی از جمله موقعیت جغرافیایی و میزان تابش، اندازه‌ی سیستم، مقدار پنل نصب‌شده، نوع BOS مورد استفاده، بازده پنل و روش بهره‌برداری و نگهداری دارد.

$$EPBT = \frac{\text{Total Energy Consumed (kWh)}}{\text{Annual Power Generation (kWh/Year)}}$$

در جدول ۳ کل انرژی مصرفی و مقدار انرژی تولیدی سالانه و زمان بازپرداخت انرژی برای ۶ مورد مطالعاتی مشاهده می‌شود. زمان بازپرداخت با لحاظ کردن انرژی مورد نیاز جهت نگهداری به دست آمده است. این مقدار در سطر سوم لحاظ شده است. دقت شود که هر ۱ کیلووات ساعت برابر ۳.۶ مگاژول می‌باشد.

جدول ۴: EPBT

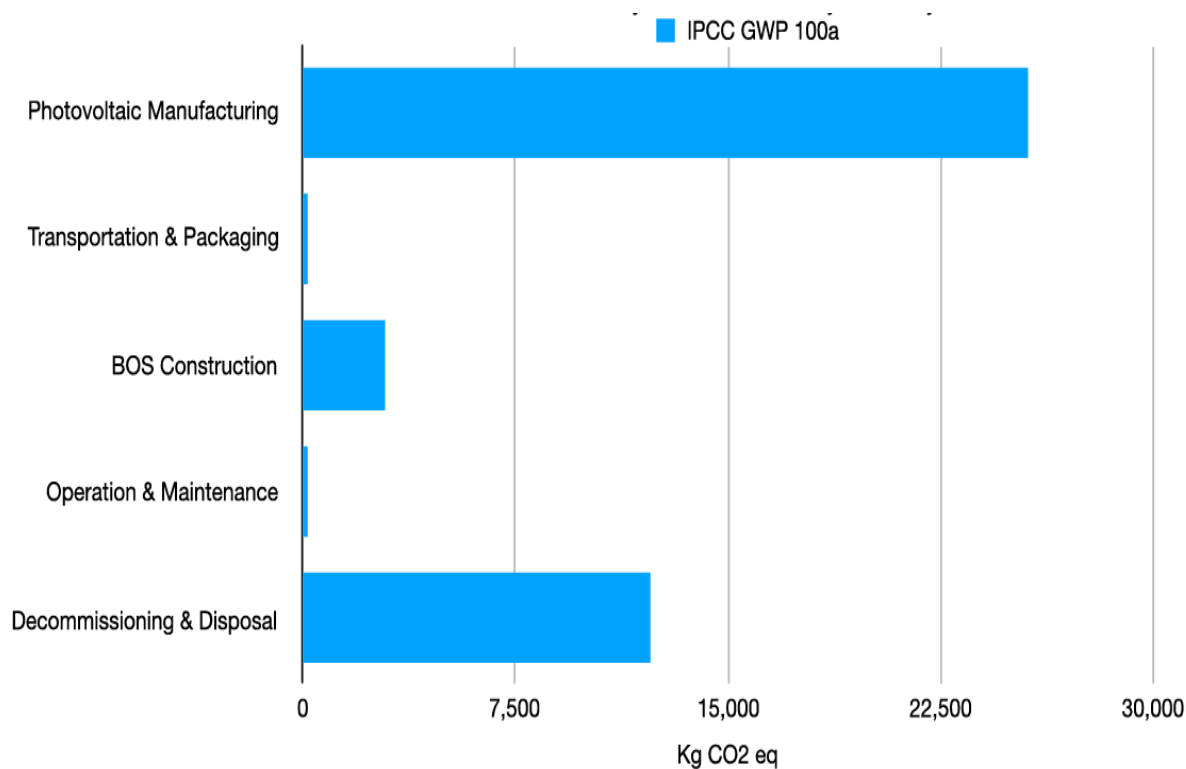
	SAPV1	SAPV2	SRPV1	SRPV2	SFPV1	SFPV2
Total Energy Consumed (MJ)	430985	14352917	8639518	289760	967745012	289607589
Annual Power Generation (kWh)	3348	266450	73000	10290	10120000	2970720
Maintenance (MJ/year)	102	4908	86	92	54813	109
EPBT	36.1	15	32.9	7.84	26.6	27.1

۱۴) ارزیابی اثرات چرخه‌ی عمر (LCIA) Life Cycle Impact Assessment

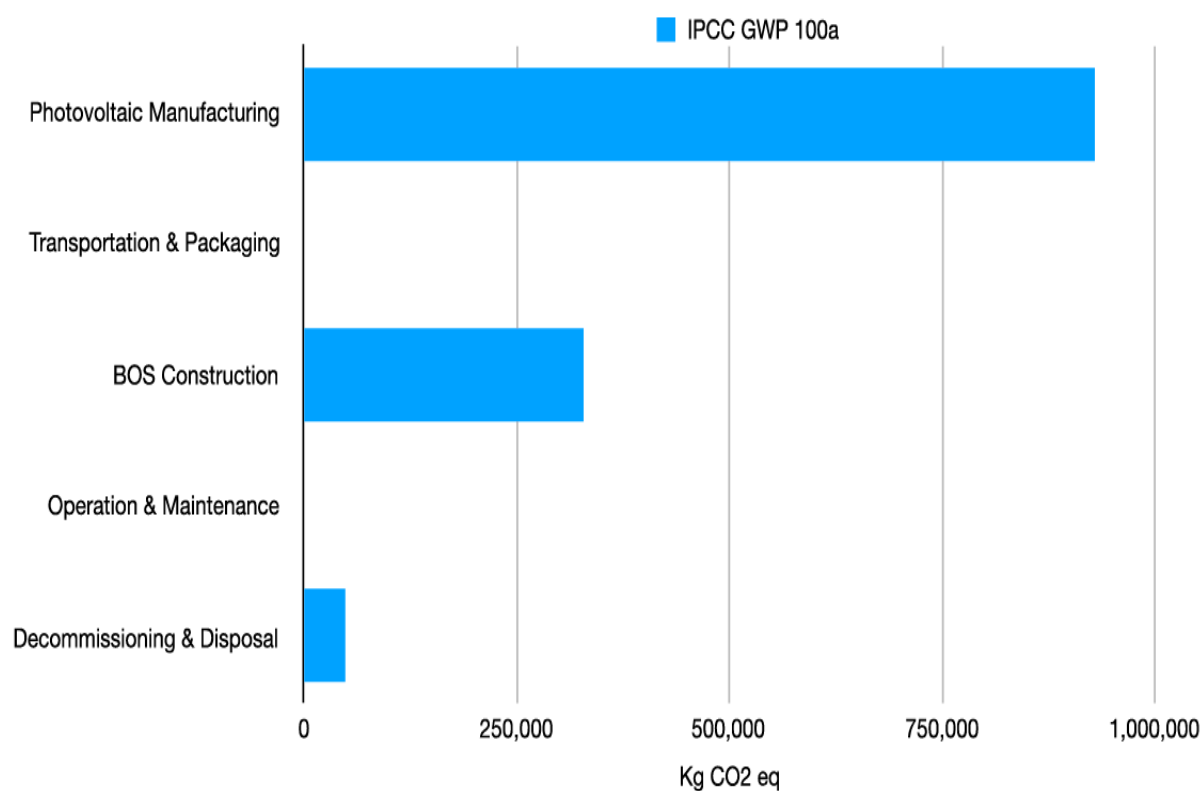
۱۴-۱- پتانسیل گرمایش جهانی (IPCC GWP 100a) Global Warming Potential

پتانسیل گرمایش جهانی بر مبنای گزارش IPCC 2013 شامل عوامل تغییر اقلیم در یک بازه‌ی ۲۰ ساله است. در ادامه نمودارهای مربوط به اثر GWP برای ۶ مورد مطالعاتی مشاهده می‌شود.

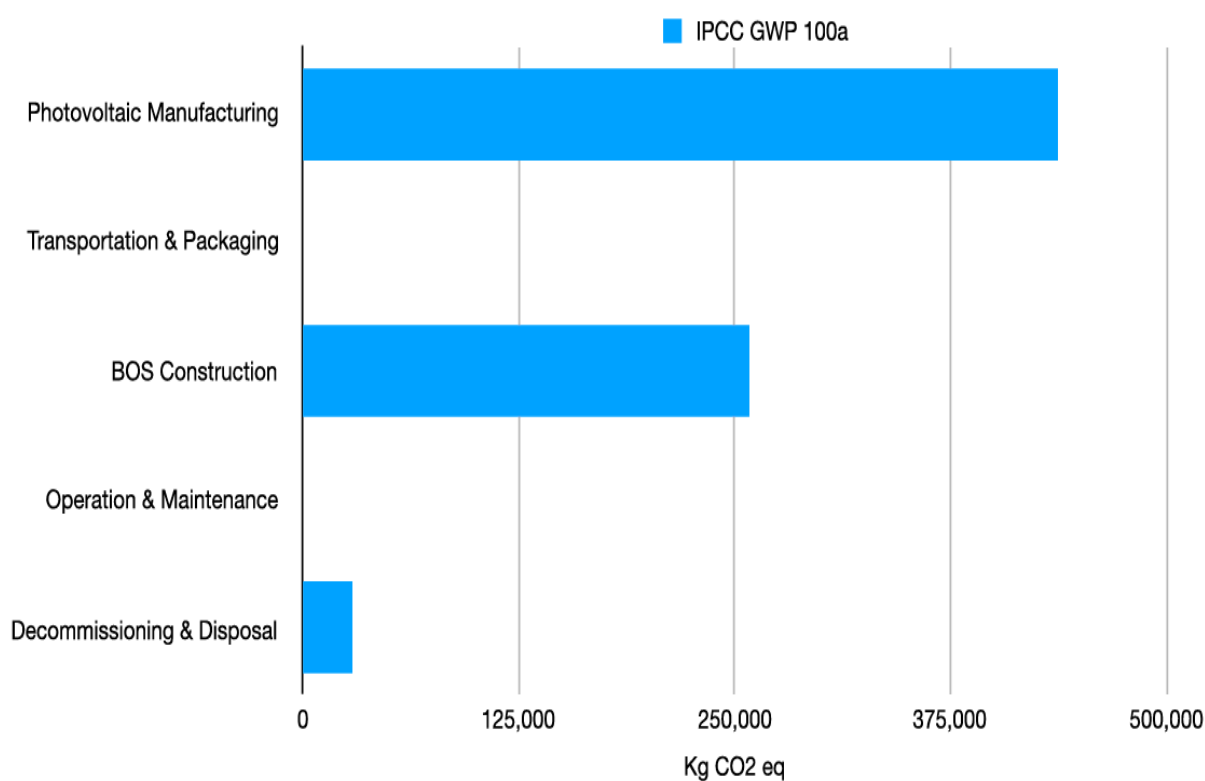
شکل ۱۹) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم PV مستقل (SAPV) مالزی



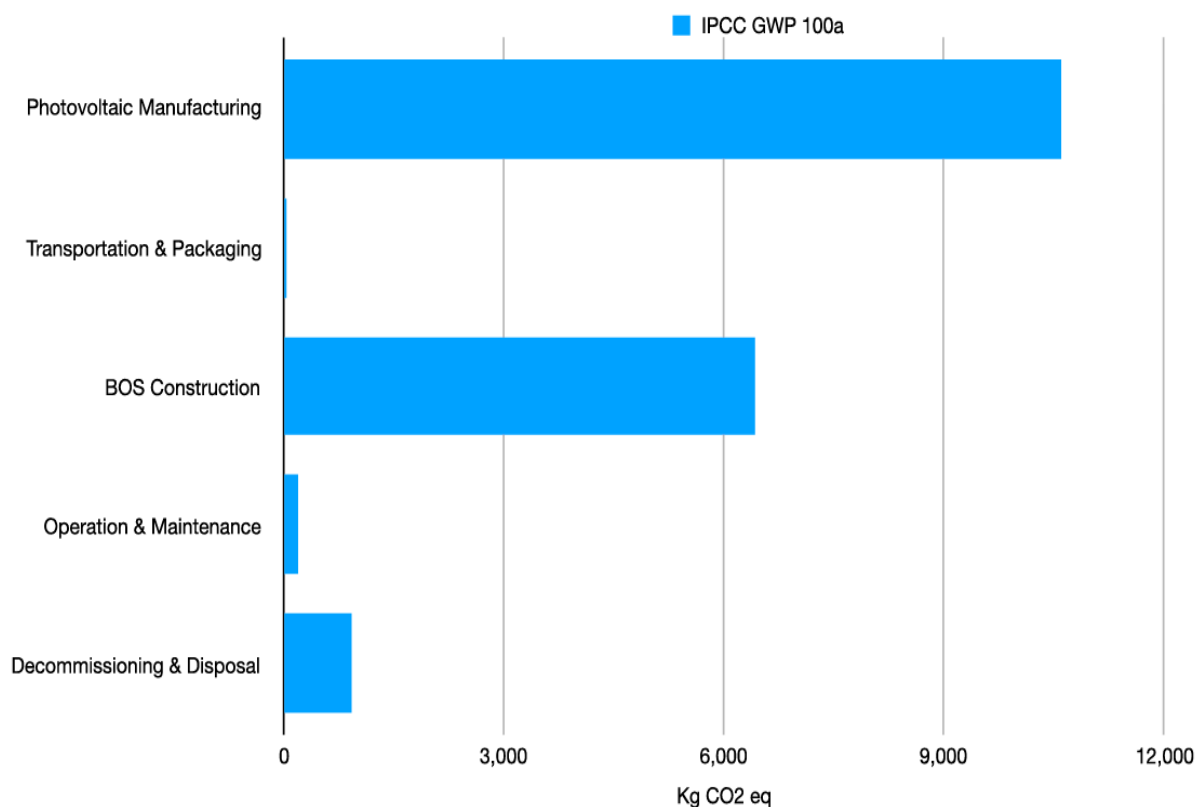
شکل ۲۰) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم PV مستقل (SAPV) تایلند



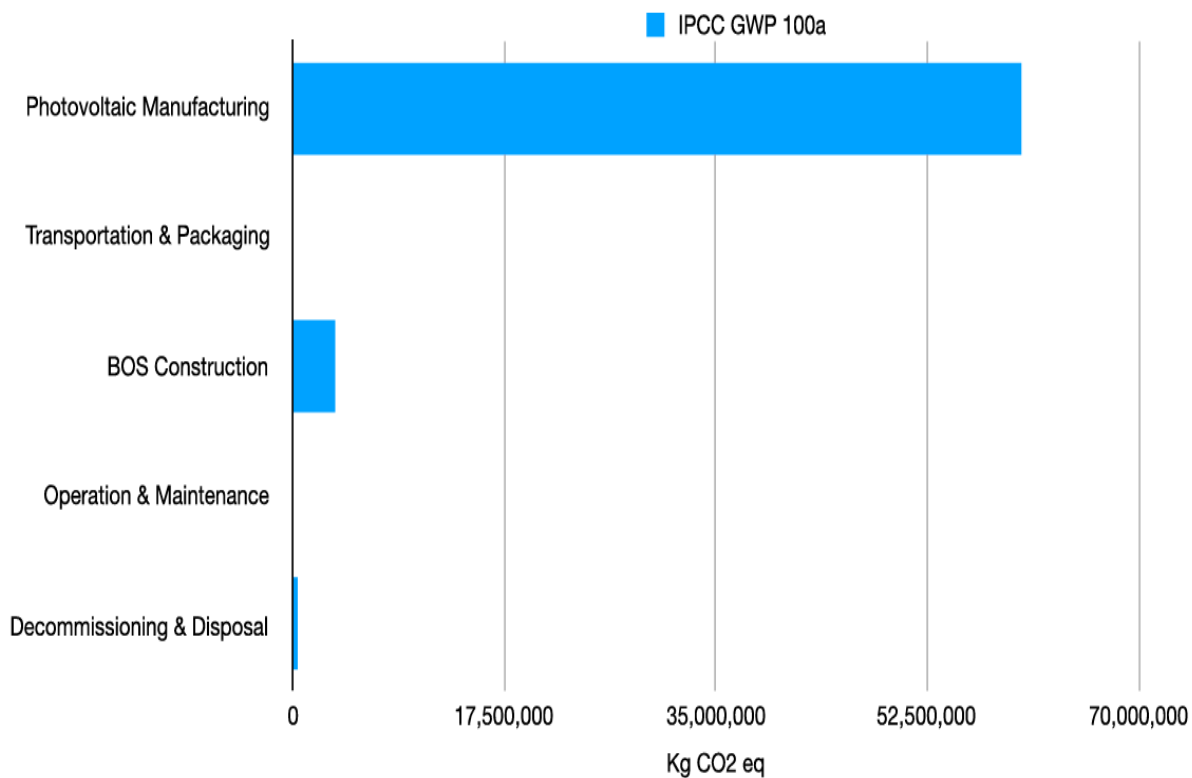
شکل ۲۱) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم پشت‌بام خورشیدی (SRPV) مالزی



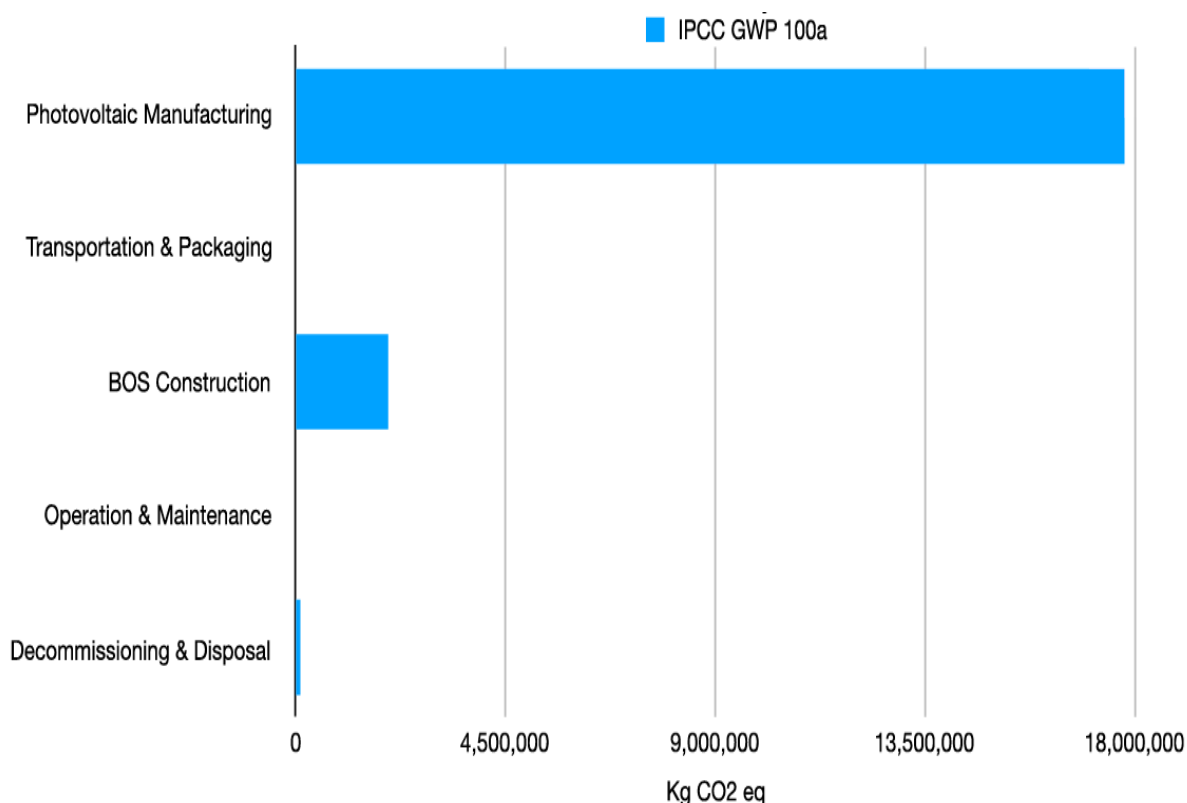
شکل ۲۲) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم پشت‌بام خورشیدی (SRPV) تایلند



شکل ۲۳) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم مزرعه‌ی خورشیدی (SFPV) مالزی



شکل ۲۴) پتانسیل گرمایش جهانی-سیستم مزرعه‌ی خورشیدی (SFPV) اندونزی



مطابق انتظار مشخص است که در تمام موارد بیشترین مقدار مربوط به فاز manufacturing می‌باشد و به جز دو مورد SAPV مالزی و SRPV تایلند که فاز برچیدن و دفع در رتبه‌ی دوم قرار دارد، در بقیه‌ی موارد فاز BOS construction بعد از manufacturing قرار گرفته است.

۱۴-۲- پتانسیل گرمایش جهانی (IPCC GWP 20a) Global Warming Potential

نتایج و نمودارهای این دسته اثر هم مشابه حالت قبل می‌باشد و به دلیل جلوگیری از طولانی‌شدن گزارش از درج آن‌ها خودداری شده است.

۱۴-۳- پروتکل گازهای گلخانه‌ای (GHG Protocol) Greenhouse Gases Protocol

GHGP به عنوان یک استاندارد بین‌المللی برای محاسبه و گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، که گازهای گلخانه‌ای را بر اساس منبع به محدوده‌های مختلف طبقه‌بندی می‌کند. در نمودارهای صفحات بعد انتشارات هر فاز به چهار گروه مختلف تقسیم شده‌اند:

<< کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی

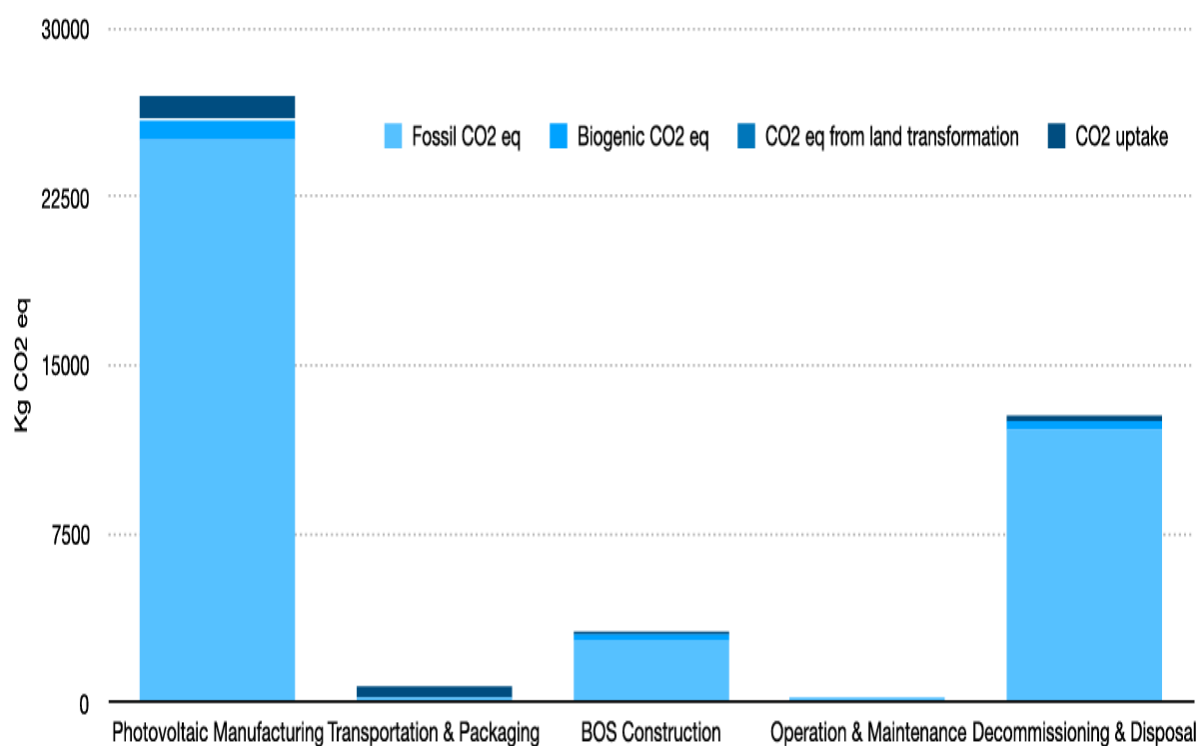
<< کربن بیوژنیک: کربنی که از منابع بیوژنیک مانند گیاهان و درختان منتشر می‌گردد.

<< کربن حاصل از دگرگونی و تغییرات کاربری زمین

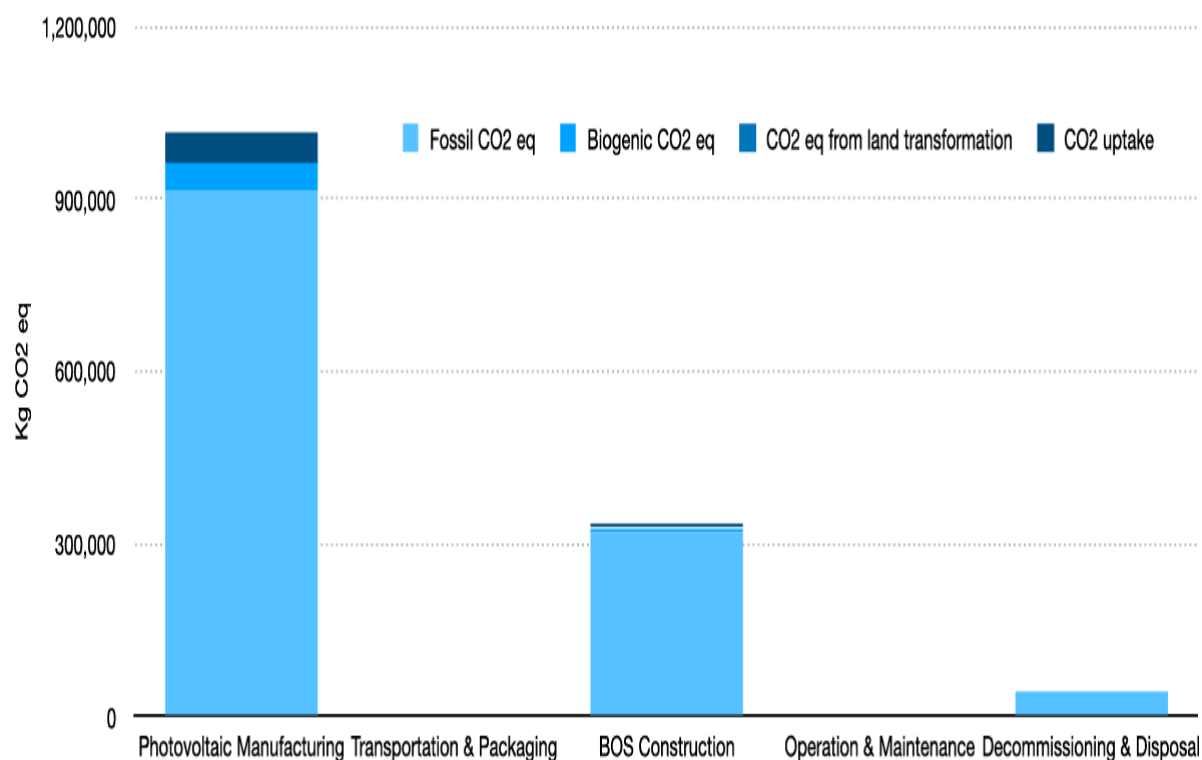
<< جذب کربن (دی‌اکسید کربنی که هنگام رشد گیاهان و دختان در آن‌ها ذخیره می‌شود)

همانگونه که مشخص است بیشترین سهم، با اختلاف زیاد، مربوط به سوخت‌های فسیلی می‌باشد.

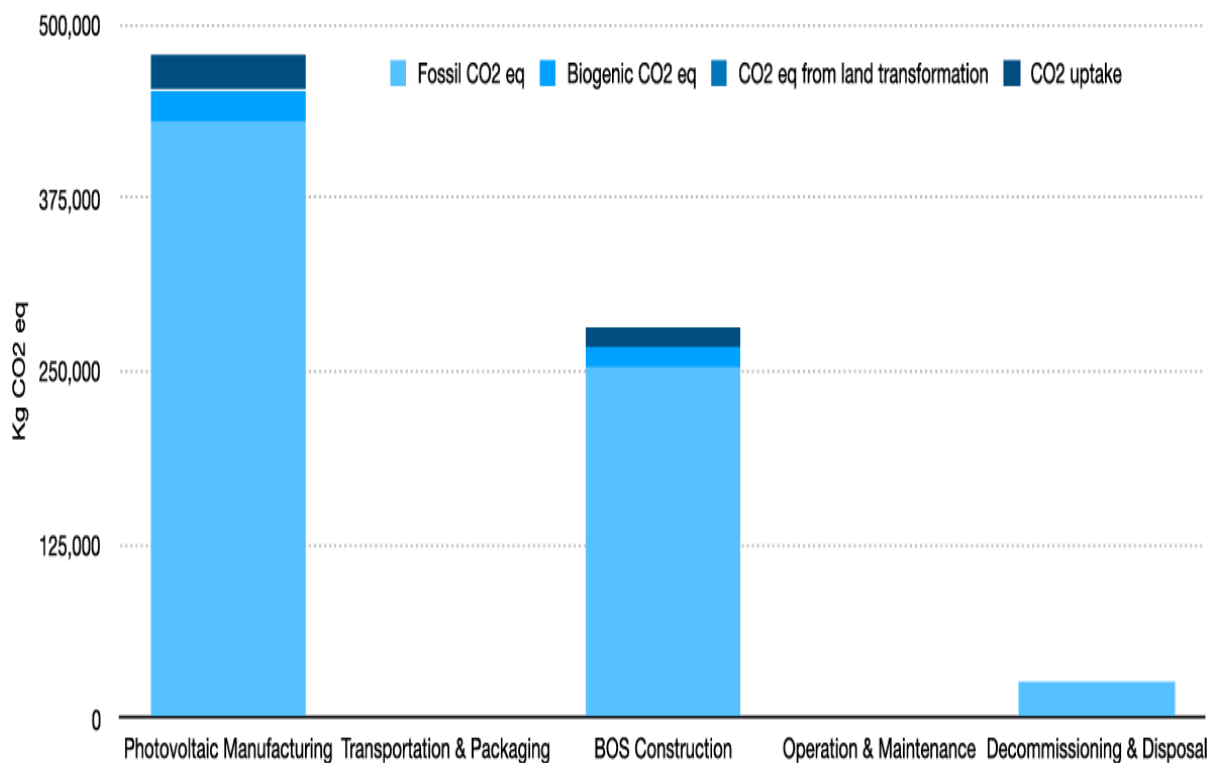
شکل ۲۵) GHG سیستم PV مستقل (SAPV) مالزی



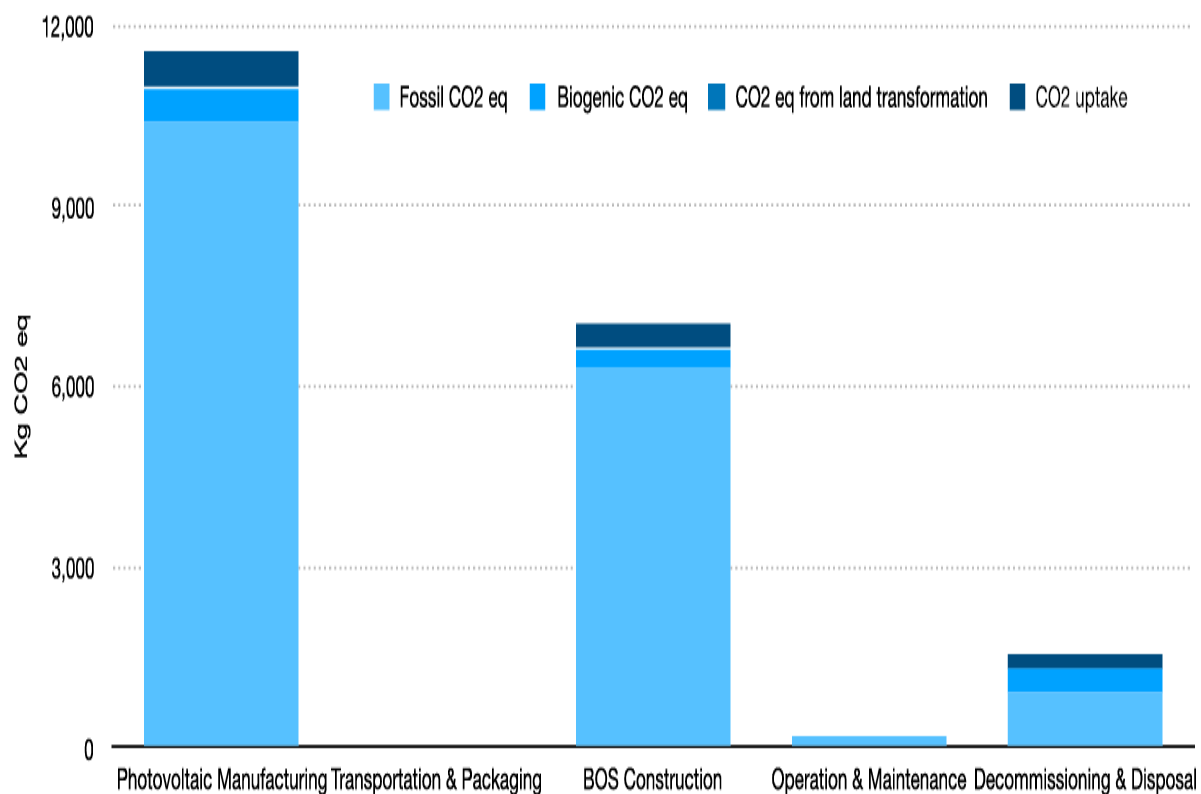
شکل ۲۶) GHG سیستم PV مستقل (SAPV) تایلند



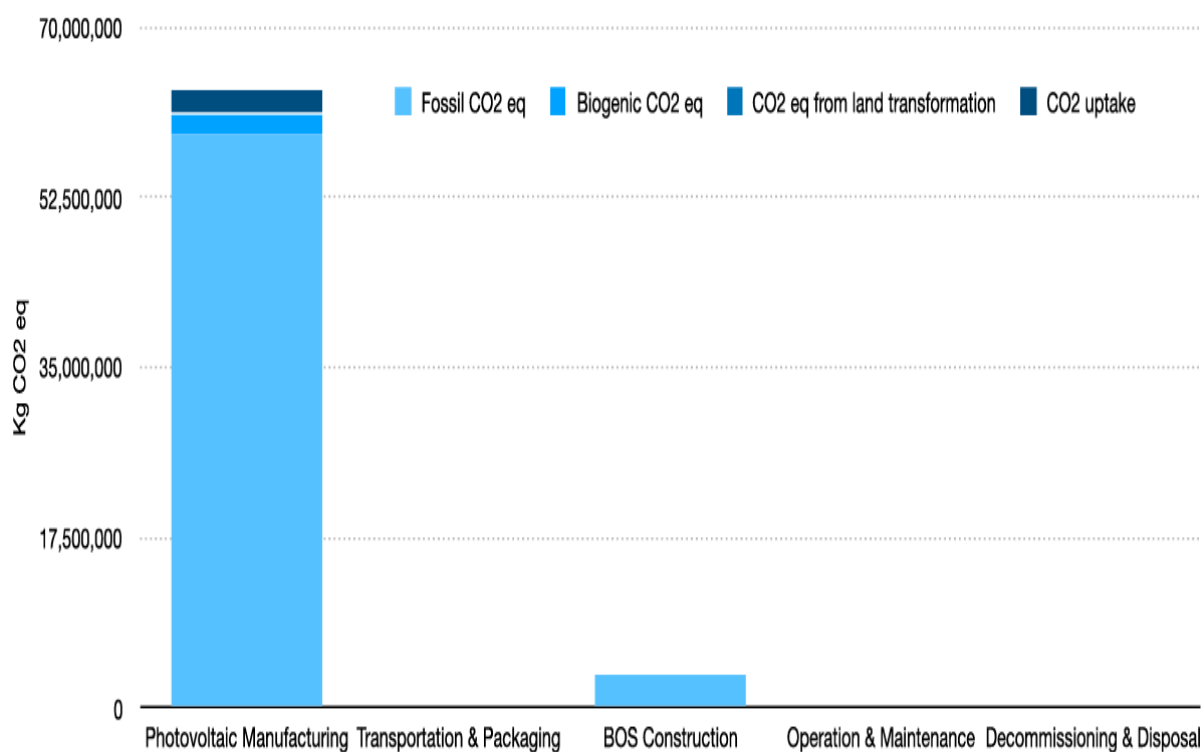
شکل ۲۷) GHG پشت‌بام خورشیدی (SRPV) مالزی



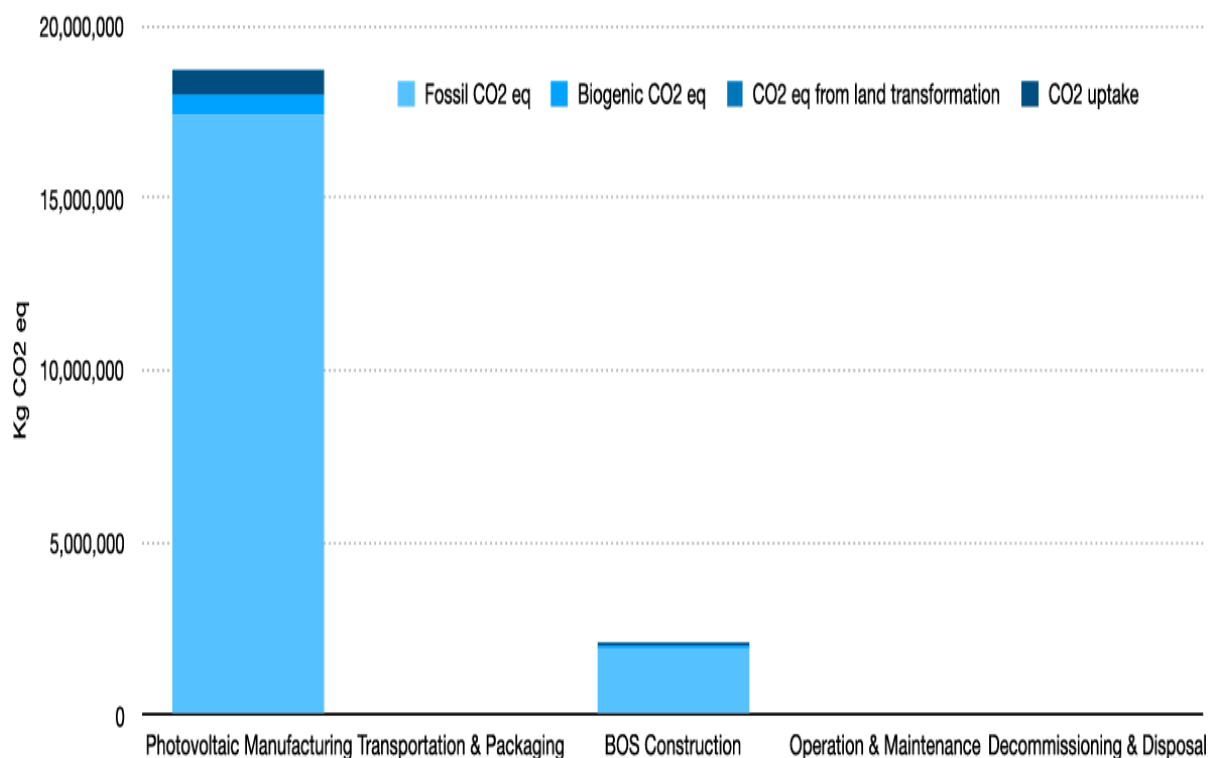
شکل ۲۸ GHG پشت‌بام خورشیدی (SRPV) تایلند



شکل ۲۹ GHG مزرعه‌ی خورشیدی (SFPV) مالزی



شکل ۳۰ GHG مزرعه‌ی خورشیدی (SFPV) اندونزی



۱۵ نتیجه‌گیری

مهمترین نکته در این گزارش اعداد به‌دست‌آمده برای زمان بازپرداخت انرژی سیستم‌ها می‌باشد. در حالیکه طول عمر سیستم‌ها ۲۵ سال در نظر گرفته شده و در دو مورد سیستم مستقل و پشت‌بام خورشیدی در مالزی، اعداد به‌دست‌آمده ۳۲ و ۳۶ سال بوده که بسیار بیشتر از ۲۵ سال عمر نیروگاه است. در دو سیستم مستقل و پشت‌بام خورشیدی در تایلند با EPBT برابر ۷ و ۱۵ سال نتیجه‌ی مطلوبی حاصل شده است. در هر دو مزرعه‌ی خورشیدی هم EPBT تقریباً با عمر سیستم برابر است. بررسی چرخه‌ی عمر و حصول این اعداد نشان می‌دهد که با توجه به تکنولوژی‌های موجود و به‌خصوص برای کشورهایی با منابع طبیعی سرشار باید با تامل بیشتری نسبت به استفاده از این سیستم‌ها در سطح کلان قضاوت کرد (نباید شرایط تحریم کشور ما و عدم دسترسی به تکنولوژی‌های با کیفیت و به‌روز دنیا را نیز فراموش کرد). در حالت کلی رشد و ترویج فن‌آوری‌های PV با انرژی و هزینه‌ی کمتر باعث افزایش احتمال کاهش GWP و انتشار گلخانه‌ای در طول چرخه‌ی عمر آن می‌شود. نوآوری در ساخت ماژول می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌ی تمام‌شده‌ی ماژول و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول ساخت شود. EPBT را می‌توان همراه با کاهش ضخامت ویفر و مقدار سیلیکون هدررفته در فرآیند تولید کاهش داد. تمرکز بر یافتن راه‌حل جایگزین برای فرآیند تولید بهتر فتوولتائیک باید به عنوان بهترین روش برای بهبود کیفیت سیستم در نظر گرفته شود. بیشترین مقدار مصرف انرژی و انتشار مربوط به فاز تولید (MANUFACTURING) می‌باشد. CED هر دو SAPV1 و SAPV2 به ترتیب ۸۱٪ و ۸۲٪ برای تولید فتوولتائیک است. پس از فاز تولید در SAPV1 بیشترین CED در فاز حمل و نقل و بسته‌بندی با ۴٪ است. در همین حال، برای SAPV2، BOS با ۱۸٪ دومین است. این به این دلیل است که SPV1 یک سیستم مستقل (مزرعه‌ی خورشیدی مستقل) در مقیاس بزرگ بوده و نیاز به BOS بزرگتری دارد. به‌طور مشابه برای SRPV1، SRPV2، SFPV1، SFPV2 هم فاز manufacturing به‌ترتیب با ۶۴٪، ۵۹٪، ۷۵٪ و ۷۴ درصد بیشترین مقدار CED را به

خود اختصاص داده است. در تمام این سیستم‌های بزرگ، BOS به ترتیب با ۳۵٪، ۳۴٪، ۲۵٪ و ۲۶٪ در رده‌ی بعدی CED قرار دارد. این ثابت می‌کند که اندازه سیستم نقش مهمی ایفا می‌کند. SRPV2 دارای سریع‌ترین دوره‌ی EPBT (۷ ساله) در مقایسه با سایر سیستم‌های PV است. سیستم فتوولتائیک برای هر شش مطالعه موردی بسته به عوامل مورد بحث، جوانب مثبت و منفی خود را دارد. تولید PV به دلیل مصرف انرژی زیاد در طول فرآیند رشد شمش، بیشترین تأثیر را بر EPBT می‌گذارد. با این حال، به طور کلی EPBT سیستم‌های PV، با توجه به اندازه‌ی سیستم، مقدار پنل نصب‌شده، نوع BOS مورد استفاده، بازده پنل، منطقه‌ی جغرافیایی و میزان تابش دریافتی و روش بهره‌برداری و نگهداری متفاوت است. بنابراین در انتخاب یک سیستم فتوولتائیک جدید باید این عوامل را در نظر گرفت تا با کمترین مصرف انرژی، کارآمدترین سیستم حاصل شود. این به نوبه خود اثرات زیست‌محیطی سیستم PV را بهبود می‌بخشد و منجر به یک سیستم کارا با ردپای کربن کوچک می‌شود. SAPV در مقیاس کوچک از نظر انتشار CO_2eq کارآمد نیست زیرا تولید توان کم و CED بالایی از مرحله‌ی تولید PV دارد. برای هر سیستم SAPV توصیه می‌شود که در مقیاس بزرگ باشد. EPBT یک سیستم SAPV و SRPV در مقیاس بزرگ نیز به اندازه‌ی بیش از نیمی از سیستم مقیاس کوچک کاهش می‌یابد. در حالت کلی در شرایط یکسان برای سیستم‌های PV ترجیح بر این است که در مقیاس بزرگتری ساخته شود چون باعث کاهش انتشارات و EPBT می‌شود.

References

- [1] <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [2] Chen F F, An Indispensable Truth: How Fusion Power Can Save the Planet, 43 DOI 10.1007/978-1-4419-7820-2_2, © Springer Science+Business Media, LLC 2011
- [3] U.S. Department of Energy The history of solar Office of Energy Efficiency \& Renewable Energy, accessed August 9, 2015.
- [4] Dewi T, Risma P, Oktarina Y, Roseno M T, Yudha H M, Handayani AS, and Wijanarko Y, A Survey on Solar Cell; The Role of Solar Cell in Robotics and Robotics Application in Solar Cell Industry in Proc Forum in Research, Science, and Technology FIRST 2016 pp C19-C22.
- [5] Jäger K, Isabella O, Smets A H M, van Swaaij R A.C.M.M, and Zeman M, 2014 Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems, Delft University of Technology.
- [6] Akarslan F 2012 Photovoltaic Systems and Applications Modeling and Optimization of Renewable Energy System ed Sencan Arsu chapter 2 pp 21-52.
- [7] Murphy F, and McDonnel K 2017 A Feasibility Assessment of Photovoltaic Power Systems in Ireland; a Case Study for the Dublin Region, Sustainability, vol 9 pp. 302-316.
- [8] IEA guidelines (2010)
- [9] Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region, APEC Energy Working Group, April 2019
- [10] Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis, Maria Milousi, Manolis Souliotis, George Arampatzis and Spiros Papaefthimiou, May 2019