

ВЛИЯНИЕ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО ВЪРХУ ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ФОТОВОЛТАИЧНИТЕ МОДУЛИ

Силвия Лецковска
Камен Сейменлийски
Бургаски свободен университет

INFLUENCE OF POLLUTION ON THE PRODUCTIVITY OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Silviya Letskovska
Kamen Seymenliyski
Burgas Free University

Abstract: *In the present work some questions connected with the effectiveness of the photovoltaics are discussed. The main factor is the pollution (morphology and chemical composition) and the humidity. The methods for estimation the degree of the pollution are shown.*

Keywords: *PV-system, solar radiation, pollution, PV-panels .*

Въведение

Ежегодно на нашата планета постъпва огромно количество слънчева енергия. На съвременния етап от развитието на технологиите слънчевите клетки са основен източник за преобразуването ѝ в електрическа. Фотоволтаичната технология е особено важна за производството на електроенергия в селските и пустинни райони. Продукцията на PV-централите се оценява от производителите при стандартни условия на изпитване (STC) – температура 25°C, слънчева радиация 1000 W/m², като слънчевият спектър се филтрира при преминаване през атмосферата. Тези условия лесно се пресъздават в лаборатория, но ситуацията е различна от тази на открит терен.

Мощността на фотоволтаичните системи зависи от интензивността на слънчевото излъчване. Равномерната осветеност на модулите осигурява високата им ефективност, а повишаването на температурата се отразява негативно на способността за генериране на напрежение. Ефективността на работата им се влияе от редица фактори, такива като: часово време и климатични условия; смяната на деня в нощ; неравномерност на осветяване; повишаване на температурата; замърсяване.

Съществено влияние върху ефективността на фотоволтаичните панели оказват отложените върху тях прах и влага. Влиянието на тези фактори се засилва, т.к. през последните години има тенденция за инсталирането им в трудно достъпни райони – такива, каквито са пустините.

Примери за такива инсталации има в САЩ, Северна Африка, ОАЕ, Саудитска Арабия, пустинята Атакама в Чили, Австралия и Индия. В тези райони замърсяване-

то с прах и пясък е сериозен проблем, който влияе върху ефективността на фотоволтаичните централи. Проблемите, свързани със замърсяването, трябва да бъдат изследвани и анализирани с цел определянето на загубите, планиране на поддръжката, определяне на жизнения цикъл на компонентите и оценката на активите за банкиране.

Замърсяването е сложен процес, който силно зависи от местните условия. Типа на повърхността, ветровете, влажността и температурата на въздуха са основните природни параметри, които влияят върху замърсяването. Антропогенните фактори също играят важна роля, селскостопанската дейност, трафика и замърсяването на въздуха допринасят за отлагането на прах и замърсители върху фотоволтаични панели.

III. МОРФОЛОГИЯ И СЪСТАВ НА ЗАМЪРСИТЕЛИТЕ И ВЛИЯНИЕТО ИМ ВЪРХУ РАБОТАТА НА ФОТОВОЛТАИЧНИТЕ УСТРОЙСТВА

Основните замърсители, които влияят пряко върху производителността PV-централи могат да бъдат класифицирани в следните групи:

- Прах, пясък и други въздушни частици. Те се натрупват по естествен път на повърхността на фотоволтаичните модули, концентриращите огледала и лещи. Това намалява енергийната мощност на фотоволтаичните инсталации, особено на тези, разположени в сухите райони със селскостопански дейности и региони със сипкава почва;

- Въздушни замърсители, като изпарения, смог и сажди. Те могат да образуват повърхностен слой, който е по-труден за почистване отколкото праха и пясъка. Това е особено важно в градските и индустриалните райони;

- Отлагане на пясък и прах в сухите области. То може да се увеличи с нощната роса, тъй като прахът и пясъчните частици се прилепват на мокрите повърхности много по-бързо и лесно. През деня прахът изсъхва и се изпича на слънце, а през нощта се натрупва върху влажната повърхност отново. Процесът се повтаря, образувайки дебел слой прах, който може напълно да блокира светлината;

- Замърсявания в долната част на фотоволтаичните панели, които имат повдигната монтажна рамка, осигуряваща частично засенчване и намаляване на ефективната площ на фотоволтаичния модул. Това е особено важно в районите близо до екватора, тъй като панелите обикновено се инсталират с малък ъгъл на наклона, за да получат максимално количество слънчева радиация през деня;

- Мухъл и плесен. Те също може да се образуват на повърхността на фотоволтаични панели в топли и влажни зони. Натрупаната през деня топлина и влажността през нощта осигуряват идеални условия за разпространение на микроорганизми и формиране на непрозрачен слой на повърхността на фотоволтаичните модули;

- Птичите куришки на някои места могат да бъдат достатъчни, за да осигурят частично блокиране на клетките в модулите. Това обикновено причинява спад в ефективността на модула или на целият стринг. Тези отлагания влияят и върху ефективността на рефлекторните огледала.

Установяването на зависимостта между физичните характеристики на праховите частици (размер, геометрия, състав) и работата на фотоволтаичния панел е потенциално критичен ключов елемент за разработването на ефективни техники за намаляване и превенция на замърсяването. Физичната природа на праха и характеристиките на отлаганията са тясно свързани със дадения географски регион, в които се провеждат съответните изследвания.

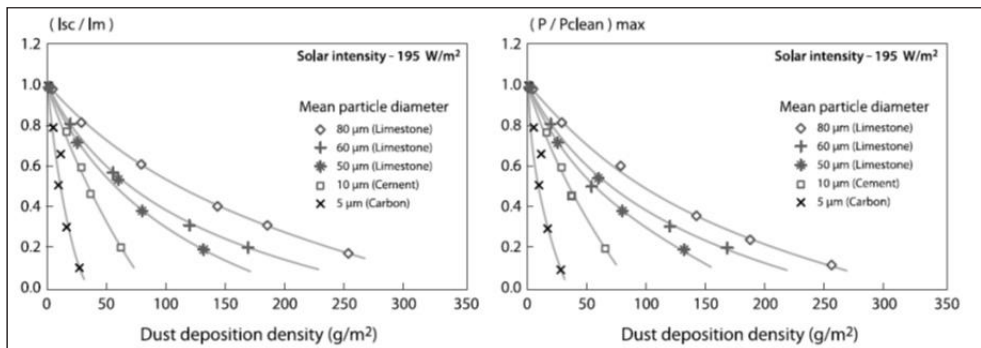
Едно от първите изследвания, проведено в контролирана лабораторна среда е свързано с изследване на физичните свойства на праховите частици, натрупани на повърхността на PV-модул, както и на плътността на отложените слоеве [1, 2]. Използвани са различни видове прахове, които имат физични свойства и състав, съответстващи на атмосферните. Това са праховете на основа на варовик, цимент (поради наличието му в използваните масово строителни материали) и въглерод (основен присъстващ в повечето горивни процеси).

Симулирано е слънчево излъчване с помощта на халогенни лампи, осигуряващи мощност на излъчване около 195 W/m^2 върху повърхността на модула, като тока и напрежението са измерени на кристално-силициев модул при температури на устройствата между $30^\circ\div 32^\circ \text{ C}$.

След експериментите прахът е събиран, изсушаван и претеглян, за да се определи повърхностната плътност на отлаганията. Процесът е извършен няколкократно за различните плътности за всеки вид прах.

Измерени са четири важни параметъра: ток на късо съединение, изходна мощност, намаляване на слънчевата интензивност (редуциране) и фактор на запълване на слоя (FF).

Получените резултати, представени на Фиг. 1 показват, че токът на късо съединение и изходната мощност имат сходни тенденции на изменение в зависимост от плътността на праховете.



Фиг. 1. Изменение на тока на късо съединение и изходната мощност при различна плътност на отложените върху фотоволтаичния панел прахове

От представените данни се вижда също, че производителността на фотоволтаичните зависи не само от отлагането на различни видове прах, но и от физичните размери на отделните частици.

При по-фин прах се наблюдава много по-голям негативен ефект върху производителността.

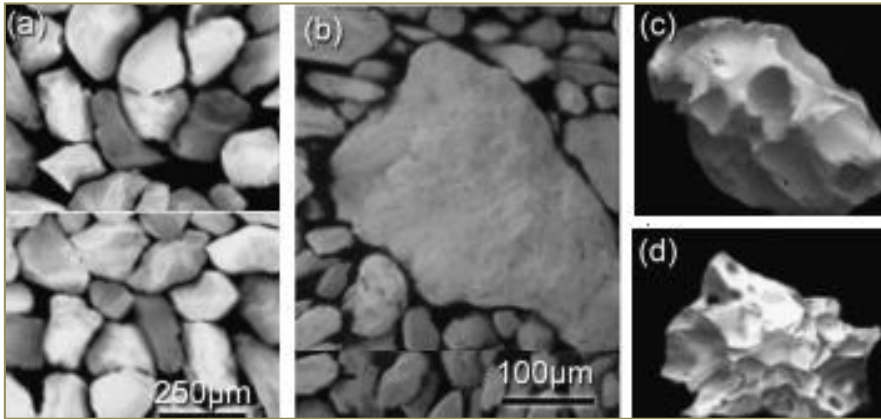
Резултатите от изследванията са показали, че естеството на праха като прахов състав, разпределение на размера му и плътността на нанасяне силно влияе върху загубата на изходна мощност от фотоволтаичните модули.

По този начин са идентифицирани три ключови фактора, които допринасят за влошаването на производителността: химичен състав на праховото покритие, разпределение на размера на праховите частици, определено чрез средния им диаметър и стандартното отклонение на размера и плътността на отложения прах (Фиг. 2).

Изследванията показват един интересен факт – въглеродните частици влияят най-интензивно на изходната мощност на модулите.

Доказано е, че в конкретна географска област съставът на праха може значително да варира при изменения в околната среда. (Фиг.2, а и b), както може да се изменя и морфологията на частиците – от заоблени до груби (Фиг. 2, с и d) [3].

Тази морфология може значително да повлияе на взаимодействието с различни повърхности и на силите на захващане или задържане на даден прах върху дадена повърхност.



Фиг. 2. Сравнение на размера и морфологията на частици от прах от повърхността на фотоволтаичен модул:

- a* – среден диаметър на частиците 120 μm с равномерно разпределение (Либия);
- b* – бимодално разпределение с размер на частиците 400 μm и 80 μm, получено с помощта на SEM (Ирак);
- c* – единични частици със заоблени краища, вероятно от наличието на вятър (Либия);
- d* – частици с по-груба морфология с диаметър 120 μm (Оман)

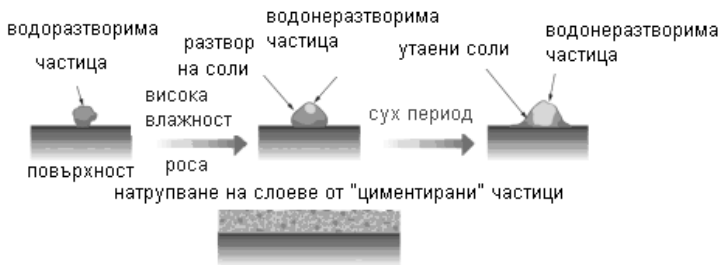
Анализът на прах от фотоволтаичните панели в Съединените щати и регионите на MENA (Близкия Изток и Северна Африка) показват, че основните компоненти са силикати (SiO_2) – около 75%, и фелдшпати ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$, KAlSi_3O_8) – около 20%.

Дъждът, допълнителната влага и особено тежките сутрешни роси не са превенция за намаляване на праха. Всъщност дъждът може да влоши проблема с праха, ако продължителността му е кратка и интензивността лека.

При леки дъждове дъждовните капчици могат да събират частици във въздуха и да натрупват високи концентрации на такива върху повърхността на модула. Ако дъждът не продължи, за да измие този остатък, след изсъхване се образуват големи области със замърсявания.

Механизмите на отлагането и замърсяване са: „циментиране“ чрез водоразтворими соли, отлагане на органични материали, поява на повърхностно напрежение и енергийна активност на частиците [4-6].

Процесът на циментиране е критичен процес в много региони на света, имащи високи нива на прах и влажност (Фиг. 3).



Фиг. 3. Процес на цементация в следствие на наличие на влага и прах

Атмосферният прах съдържа неорганични и органични частици, които съдържат някои разтворими във вода, както и неразтворими соли. При висока влажност водоразтворимите прахови частици на повърхността на модула образуват микроскопични капчици солеви разтвори, които също задържат неразтворими частици. Когато се изсуши, утаеният материал действа като цимент за закрепване на неразтворимите частици към повърхността.

Силите на повърхностното напрежение могат да създадат големи вътрешни налягания във водните капки.

Енергийната активност на частиците е причината за захващането и задържането им на повърхността, като силите на привличане нарастват пропорционално с намаляване на размера им в диапазон под 10 μm . Доказано е експериментално, че скорост на вятъра под 150 m/s не е ефективна за отстраняването на плътно захванати частици по-малки от 10 μm .

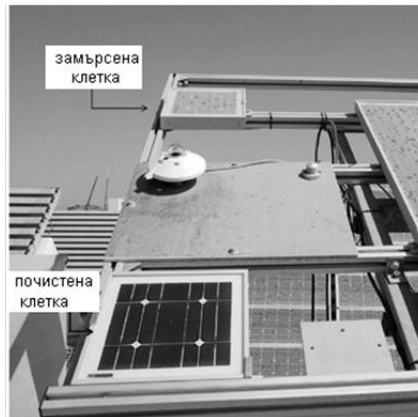
II. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СТЕПЕНТА НА ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИТЕ ПАНЕЛИ

Известни са няколко основни метода за определяне на замърсяването на работната повърхност на слънчевите панели:

- *Метод на сравнение на волт-амперните характеристики.* Сравнително достъпен метод, при който се сравняват реалната V-A характеристика с получена такава при въвеждане в експлоатация на фотоволтаичната централа. При въвеждането се правят редица тестове – те са много важни за следващи оценки на работата на централата. Максимално точни данни за сравнение може да се получат само, ако са получени при същите условия, като базовите. Тъй като това на практика е сложно, данните обикновено се фиксират за няколко дни, за да се получат средни стойности, които се сравняват с базовите показатели, получени при аналогични климатични условия. Основен недостатък на метода е, че не отчита стареенето на модулите или изхода от строя на някои от тях (тази грешка ще се увеличава с времето), загубите при преобразуване на електроенергията от постоянен в променлив ток и т.н. Освен това трябва да се отчита и грешката на измервателните прибори, поради която получените данни могат да имат отклонение в рамките на $\pm 2\%$;
- *Метод на пробно почистване.* Той дава възможност да се сравнят резултатите от генериране на електрическа енергия преди и след измиване на контролна група модули. За целта се избират модули, разположени в средата

на масива (приема се, че е налице равномерно замърсяване), или се избират отделни панели, разположени на различни места в масива. Снема се V-A характеристика, измиват се панелите и се снемат повторни данни при приблизително същите климатични условия и в същото време. След сравняването на резултатите може да се определи нарастването на генерираната енергия и до колко оправдано е миенето на модулите в целия масив;

- *Метод на контролен фотоволтаичен модул.* На един модул (или няколко, разположени в различни части на голям масив) се провежда постоянен или периодичен контрол на генерираната електрическа енергия. Намалването на генерацията под определено ниво налага търсенето на причините, една от които може да е замърсяването;
- *Използване на пиранометри.* Тези прибори позволяват да се измери сумарният поток слънчева радиация, който пада върху дадена равнина. Съвременните инвертори имат вход за включване на пиранометър, който позволява да се измери ефективността на функциониране на фотоволтаика. За постигане на необходимата точност пиранометърът трябва да се установи в същата посока и под същия ъгъл, каквито са тези на модула. Получените данни позволяват да се направи извод колко ефективно се приема и преработва падащата радиация. Използва се и вентилиран пиранометър с вграден вентилатор и нагревател за поддържането на чист панел за сравнение (Фиг. 4). Вентилаторът създава въздушна струя около отчитачият датчик, която не позволява събирането и натрупването на прах и твърди частици, а вграденият нагревател гарантира работоспособност при ниски температури и снеговалежи [7].



Фиг. 4

Оценяването на замърсяването е трудно поради локалния и променлив характер на околната среда. То може да се изпълни и с редица емпирични методи. Една от възможностите е да се използва референтен модул, който е обект на същата околна среда, както останалата част от инсталацията.

Данните, получени от модула се сравняват с очакван теоретичен референтен модел, като се изчислява степента на замърсяване. Този метод обаче не отчита влияние-

то на няколко променливи параметъра, като наличната радиация, влиянието на температурата и вятъра.

Разработен е опростен модел за определяне на относителните загуби на пропускливост на радиацията, дължащи се на наличието на прах върху модулите [8]. Моделът се основава на следните допускания:

- Прахообразните частици се моделират като сфери, хомогенно разпределени върху повърхността на панела.
- Всяка сфера има коефициент на отражение R , който отразява както огледалното, така и дифузното отражение.
- Общото излъчване се състои от пряка и дифузна радиация. Приема се, че дифузната е хомогенна във всяка посока и се поддържа постоянна през деня, а общата радиация, падаща върху чист модул може да се определи с помощта на израза:

$$(1) \quad G_{cc} = I_o \cos \theta + I_D$$

Където θ е ъгъл е на падане на пряката слънчева радиация върху модула. В този модел албедото се пренебрегва.

Ежедневните загуби (HL) представляват част от дневната енергия, която PV модула няма да получи в резултат на праха, отложен върху повърхността му.

Те могат да бъдат определени с помощта на зависимостта:

$$(2) \quad HL(\%) = \left(\frac{H_{cc} - H_{DC}}{H_{cc}} \right) \times 100$$

където: H_{CC} и H_{DC} са дневната радиация, измерена на чиста и замърсена повърхност (Wh/m^2).

В периодите на валежите се получава добро почистване на замърсената клетка и тя възстановява първоначалния си вид. Дори лек дъжд, под 1 мм, е достатъчен, за да почисти покривното стъкло, намалявайки ежедневните загуби под 5%. Въпреки това, в дългите периоди без дъжд през лятото, натрупването на прах може да доведе до дневни загуби над 20%. Натрупването на прах по повърхността на фотоволтаичния модул значително намалява получената енергия.

Тези загуби са зависими от ъгъла на падане на слънчевата радиация. За да се изследва тази зависимост се сравняват стойностите на радиацията за чисти и замърсени модули в рамките на деня и относителните загуби от замърсяването могат да се определят от израза:

$$(2) \quad GL(\%) = \left(\frac{G_{cc} - G_{DC}}{G_{cc}} \right) \times 100$$

където: G_{CC} и G_{DC} са стойностите на радиацията, измерена от чиста и замърсена повърхност (W/m^2).

Следва да се отбележи, че загубите, причинени от зависимостта на коефициента на пропускане на стъкленото покритие от ъгъла на падане на радиацията не влияят при изчисляването на GL, тъй като той е идентичен за чистата и замърсената повърхност на модула. Въпреки това, наличието на прах променя ъгловата зависимост на радиацията, която е различна за двата случая и точно този ефект се измерва с GL.

Отлагането на пясъци и прахови частици върху PV-повърхности в сухи области е представено с цифрови и аналитични модели и подкрепено от лабораторни изследвания при отлагане върху стъклена повърхност [9].

Свободната от частици площ A не е просто $1-N$, защото N -частиците се припокриват. Това може да се представи математически, като се има предвид вероятността малките частици да се отложат на свободната повърхностна площ $1-A$, така че $dA/dN=1-A$, $A=1-e^{-N}$.

Има обаче важни различия между този модел и реалността.

По-специално, става ясно, че има ограничения за това колко частици могат да се пакетират заедно, а не всички пясъчни частици могат да захванат втора. Общата площ е:

$$(3) \quad A = 1 - \alpha F_1 - (1 - \alpha) F_2$$

където: - α е опаковъчна фракция ($\sim 0,8$);

- F_1 и F_2 са функции на запълване на слоевете [10].

Разработен е и теоретичен модел за получаване на надеждни резултати относно очаквания ефект от регионално замърсяване на въздуха върху модулите. Замърсяването представлява червена почва, варовик и въглеродна пепел (Фиг. 5). Ефективността на преобразуване η се определя от израза:

$$(4) \quad \eta = \frac{P_{out}}{A_c G_T}$$

където: - P_{out} – изходна мощност;

- G_T – пълна слънчева радиация.

Праховото отлагане ΔM се изразява в g/m^2 чрез площта на фотоволтаичния модул A_c , като $\Delta M = \Delta m / A_c$, а Δm е общата маса на слоя прах върху повърхността на замърсения панел [10÷12].

Разработен е и модел, отчитащ влиянието на влажността върху излъчването и тока на късо съединение I_{SC} с уравнението:

$$(5) \quad \eta = \left(\frac{I_{sc \max} V_{oc \max}}{A_c} \right)$$

където: - A_c е ефективната област на модула;

- V_{oc} – напрежение при празен ход;

- η – ефективност на преобразуване.

Ефектът на действие на праха се увеличава във влажно време.



Фиг. 5. Тип на отложените замърсители на фотоволтаичните модули

Проведената експериментална процедура при чисто небе има най-малко 30 измервания в рамките на разглеждания период (120 s) с трите вида замърсители. Предложеният модел отчита вида на замърсителя, както и количественото му отлагане и кореспондира сравнително близко с получените експериментални данни.

Изводи

Енергийният добив от една фотоволтаична система обикновено се свързва с наличната слънчева радиация и спектралното разпределение, със съществуването на разнообразни екологични и климатични фактори, както и със специфичните характеристики на системите и компонентите им.

Други външни фактори са свързани с географското местоположение и местните условия, които може да окажат по-голямо въздействие върху ефективността на работата на системата. Сред тях замърсяването е често пренебрегван или подценен проблем, който може да бъде показател за жизнеспособността на слънчевата инсталация.

Представената информация има за цел да направи анализ на въздействието на факторите, свързани със замърсяването на фотоволтаичните модули, най-вече причинено от наличието на прах (пясък) и комбинирани условия на влага и на прах, присъщи на едни от богатите на слънчева енергия географски места.

Литература

1. El-Shobokshy M. S., Hussein F. M., Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on its surface. *Renewable Energy* 1993;3:585–90.
2. El-Shobokshy M. S., Hussein F. M., Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy* 1993;51:505–11.
3. Elminir H. K., Ghitas A. E., Hamid R. H., El-Hussainy F., Beheary M. M., Abdel-Moneim K. M., Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conservation and Management* 2006;47:3192–203.
4. Cuddihy E. F., Theoretical considerations of soil retention. *Solar Energy Materials* 1980;3:21–33.
5. Cuddihy E. F., Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low-soiling coatings. In: *Proceedings of the flat-plate solar array project research forum on quantifying degradation*; 1983. p. 379–96.

6. Cuddihy E. F., Willis P. B., Antisoiling technology: theories of surface soiling and performance of antisoiling surface coatings. Jet propulsion laboratory report DOE/JPL 1012-102; 1984.
7. J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouginel, J. Carretero1, P. Bernaola1, P. Carpena1, L. Mora-López2, M. Sidrach-de-Cardona, Analysis of dust losses in photovoltaic modules, World Renewable Energy Congress 2011 – Sweden, 2011, Linkoping, p.2985-2992.
8. J. K. Kaldellis, M. Kapsali, Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements, *Energy* 36 (2011) 5154-5161, www.elsevier.com/locate/energy.
9. F. Neil S. Beattie, Robert S. Moir, Charlslee Chacko, Giorgio Buffoni, Simon H. Roberts, Nicola M. Pearsalla, Understanding the effectsof sand and dust accumulation on photovoltaicmodules, *Renewable Energy*, Vol. 48, 2012, pp.448-452.
10. Kaplanis S., Kaplani E., Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules. *Simulation Modelling Practice and Theory*2011;19(4):1201-11.
11. Kaldellis. J. K, and Fragos. P, Ash depositionimpact on the energy performance of photovoltaic generators, *Journal Cleaner Production*, Vol. 19, No. 4, 2011, pp. 311-317.
12. Kaldellis. J. K, Fragos. P,M.Kapsali, Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 10, 2011, pp. 2717-2724.