

FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN GÜÇ ÖLÇÜMÜ BELİRSİZLİKLERİNİN ANALİZİ

Gonca DÜLGER¹, Yrd. Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU¹, Dipl. Phys. Alexandra SCHMID²

¹Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, Türkiye

²Fraunhofer ISE Güneş Enerjisi Enstitüsü, Freiburg, Almanya

gonca.duelger@ise.fraunhofer.de, mete.cubukcu@ege.edu.tr,
alexandra.schmid@ise.fraunhofer.de

ÖZET

Fotovoltaik modüllerin güç çıkışı ölçümleri IEC 61853 standardını takiben farklı ışınlam ve sıcaklık noktaları altında standart şartlar koşullarında gerçekleşir. Elde edilen bu sonuçlar bir projenin bankaca kabul edilirlkte esas temellerinden biri olan fotovoltaik güç santrallerinin enerji verimliliği hesaplamasında kullanılır. Verim hesaplaması hassasiyeti güç oranının ölçüm belirsizliğine bağlı olduğundan, hangi koşulların belirsizliğe etki ettiğini bilmek önemlidir. Standart şartlar altında 1000 W/m² ışınlam, 25°C sıcaklık ve 1,5 G hava kütlesi ışınlam spektrumunda yapılan belirsizlik hesaplaması zaten CalLab fotovoltaik modülleri için detaylı analiz edilmiş haliyle mevcuttur. Düşük ışınlam veya yüksek sıcaklık gibi standart şartların değişebileceği özel durumlar için ise bir çok laboratuvar ancak kabaca bir tahminle belirsizlik hesaplaması öngörüsünde bulunuyor. Yapılan bu çalışmada, 100 Watt-1100 Watt ışınlam aralığı ve 15° - 75°C arasında sıcaklık noktaları için AAA sınıfı bir solar simülatör ile standart şartlar dışında ölçümler yapılarak hangi parametrelerin belirsizlik hesaplamasına etki edeceği gözlemlenecek. Diğer bir yandan da, farklı ışınlam seviyelerindeki sıcaklık noktaları için spektrum ve ışınlamın kararlılığı, aynı zamanda da ışınlam ve sıcaklık homojenliği gibi flaşör karakteristikleri incelenecek. Yine standart şartlar dışında yapılan bu ölçümler için farklı teknolojilerdeki silikon modüllerin histerezis özelliği analizleri yapılacaktır. Elde edilen sonuçlara dayanarak standart şartlar dışında yapılan bu ölçümler için ayrıntılı bir belirsizlik hesaplaması analizi yapılacaktır.

Son olarak da aynı modüller için farklı ortamlarda belirlediğimiz dış ortam ve iç ortam güç ölçümleri belirsizlik sonuçları birbirleriyle

karşılaştırılarak sonuçların uyumları incelenecek. Bu çalışmanın sonuçlarına bağlı olarak da güç ölçümleri için daha düşük belirsizlikler önermek mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler- Verim Hesabı, Ölçüm Belirsizliği, Güç Ölçümleri, Fotovoltaik Güç Tarlaları

1. GİRİŞ

Ölçüm belirsizliğinin en aza indirgenmesi çeşitli bilim dallarında her zaman önemli bir hedef olmuştur. Öyle ki belirsizlik bir ölçümün kalitesini ortaya koyan önemli parametrelerdendir. Fotovoltaik sistem yatırımcıları ve yeni hücre teknolojileri üzerinde çalışılan bilim adamları için ilgi çekici bir noktadır. Çünkü bankalar ve yatırımcılar, hassas ölçüm hesaplarından kaynaklanan belirsizliğe göre maksimum enerji verimliliği tahminine ve ileri zaman dilimi içerisinde yatırım üzerinde minimum finansal riski sağlamayı hedeflemektedir. Ölçüm sonuçlarındaki belirgin bir belirsizlik bilimsel gelişmeye katkı sağladığı gibi özellikle yatırımcı açısından da projenin finansal riskini ortaya koymaktadır.

Genel olarak belirtilen ölçüm belirsizliği hesabı STK'ya (Standart Test Koşulları) ortamlarında 1000 W/m², 25 °C ve 1,5 Global hava kütlesi ışınlam spektrumunda ortaya konulan değerlerdir. Ancak önemli olan gerçek şartlar altında modülün güç

ölçümlerinde belirlenen belirsizlik parametreleri ve değerleridir. Literatür taraması yapıldığında bugün bir çok laboratuvar yüksek sıcaklık ve düşük ışıyım değerleri için fotovoltaik modüllerin güç ölçümlerinde net bir belirsizlik bildirememiştir. Bu çalışmada CalLab kalite modülleri kullanılarak farklı ışıyım ve sıcaklık noktaları için belirsizlik parametreleri incelenmiş, tüm ölçüm prosedürleri geniş kapsamlı olarak ele alınmış ve özellikle histerezin ölçüm belirsizliği üzerindeki etkileri saptanmıştır.

2. ÖLÇÜM EKİPMANLARI

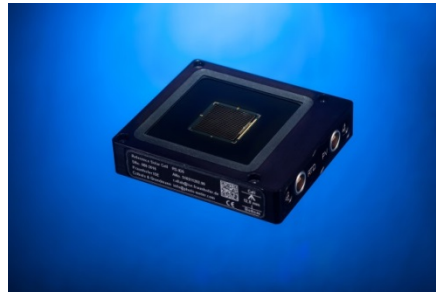
Farklı ışıyım aralıkları ve sıcaklık noktaları altında güç ölçümleri ve akım gerilim karakterizasyonu için kullanılan solar simülatör IEC 60904-9 “*Güneş simülatörü performans prosedürü*” gereğince sınıflandırılmış olup AAA kalitesinde flaşa sahiptir ve flaşlama süresi yaklaşık 80 ms'dir. Bu ölçüm süresince, flaşın zamana bağlı ölçülen belirsizliği yaklaşık olarak 0.5% 'lik bir değere sahiptir[1]. 2.1 x 1.3 m²'den küçük modül boyutları için ise alansal eşitsizlikten kaynaklı ölçüm belirsizliği 1%'den az değerdedir. Simülatör ve ölçüm düzlemi arasındaki mesafe 1.5 m'dir

Solar simülatör flaşöründe farklı ışıyım aralıkları lamba voltajının değiştirilmesi ile gerçekleşir. Düşük ışıyım ölçümleri, performans ölçümleri ve spektral uyumsuzluk hatalarının da dahil edilebildiği tüm hassas ölçümler için ölçüm süresi 0.5- 1 saat aralığındadır.

Fotovoltaik güç ölçümlerinde simülatör ışıyımı, Fraunhofer ISE tarafından üretilen referans bir hücre ile tüm ölçümler sırasında denetlenir. WPVS (World PV Scale) güneş pilleri ve modüllerin karakterizasyonunda kullanılan referans hücrelerin kalibre edilmesi için geliştirilmiş uluslararası bir standart olarak kabul edilmektedir.

WPVS'YE uygun üretilen bu referans hücreler için teknik bilgiler ise şu şekildedir :

- ✓ Referans hücre stabil alüminyum bir gövde içerisindedir.
- ✓ Boyutları: 70 x 79 x 17 mm³
- ✓ Fraunhofer Solar Enerji Enstitüsü tarafından 20 x 20 mm² 'ye kadar monokristal silikon referans hücreler üretilebilir.
- ✓ Kolay montaj edilebilir.
- ✓ Pt100 sıcaklık sensörü (4 telli) entegre edilebilir olarak üretilmiştir.
- ✓ Yeni hücrelerde negatif uyarılmış silikon materyal (n-tipi) baz olarak kullanılmış, bu sayede kızılötesi aralığında yüksek hassasiyet başarıyla entegre edilmiş ve referans hücrelerin konfigürasyonu optimize edilebilmiştir.
- ✓ Fraunhofer Solar Enerji Enstitüsü ve DakkS (The national accreditation body for the Federal Republic of Germany) tarafından isteğe bağlı olarak da PTB(The National Metrology Institute of Germany) Almanya Uluslararası Metroloji Enstitüsü tarafından denetlenir.



Şekil 1. CalLab Referans Hücresi

3. ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ

CalLab Fotovoltaik Modüller kalibrasyon laboratuvarı, DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akreditasyon

belgesine sahiptir. Ölçümlerin mükemmel tekrarlanabilirliği, dünyanın önde gelen güvenilir laboratuvarlarıyla karşılaştırılarak ve tüm ölçüm prosedürlerine eksiksiz bağlı kalarak gerçekleşir. Etiket ve veri sayfalarına dayalı şartnamelerdeki güveni arttırmaktan dolayı, olabildiğince düşük ölçüm belirsizliği modül üreticisi ve yatırımcılar için avantajdır. Bu anlamda belirsizliğin inceleneceği güç ölçümlerinde kullanılan tüm IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) standartları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.[2]

3.1. IEC 61853 Standardı : IEC Teknik Komitesi 82 kişilik bir çalışma grubu ile 15 yıldan uzun bir süredir güç ve enerji derecelendirme standardı olan IEC 61853'ü geliştirmeye çalışıyorlar. "Fotovoltaik Modül Performans Testi ve Enerji Derecelendirmesi" başlıklı standard aşağıdakileri içeren dört bölümden oluşur:

IEC 61853-1:2011:Fotovoltaik modül performansı deneyi ve enerji derecelendirmesi Bölüm 1: Işınlama ve sıcaklık performans ölçümleri ve güç derecelendirmesi, Bir dizi isinim ve sıcaklık aralığında Watt cinsinden güç derecelendirmesinin yapıldığı fotovoltaik modüllerin performansını değerlendirmek için gereklilikleri açıklar.

IEC 61853-2:2016Spektral duyarlılık, geliş açısı ve modül çalışma sıcaklığı ölçümleri ,Işınım etki eden tüm spektrum parametrelerini ölçmek adına geliştirilmiş geliş açısı, modül çalışma sıcaklığı, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve çeşitli açılar gibi etki parametre değerlerini açıklayan prosedürdür.

IEC 61853-3:Fotovoltaik modüllerin enerji derecelendirmesi, Bir fotovoltaik modülün enerjini Watt-saat cinsinden derecelendirilmesi hesaplamalarını açıklar.

IEC 61853-4: Standart günler, zaman periyotları ve hava koşulları, Güç ölçümlerinde kullanılmak üzere standart günler, zaman periyotları ve hava koşullarını açıklar.

3.2. IEC 60904 Standardı; IEC 60904 kapsamlı olarak bir fotovoltaik cihazın karakteristik özelliklerinin belirlendiği akım-voltaj(I-V) eğrisinin ölçülmesine dair tüm detayları içeren prosedürdür.

IEC 60904-1-2006 Fotovoltaik cihazların ölçülen I-V özelliklerine sıcaklık ve ışınlam düzeltmeleri için prosedürler, Doğal veya simüle edilmiş güneş ışığı altında fotovoltaik cihazların akım voltaj özelliklerinin ölçülmesine ilişkin prosedürleri açıklar. Ölçüm için temel gereklilikleri belirtir, kullanılan farklı ölçüm teknikleri için prosedürleri tanımlar. En önemlisi de ölçüm belirsizliğini en aza indirmek için gerekli uygulamaları gösterir.

IEC 60904-1-1:2017 çok kavşaklı fotovoltaik modüllerin akım-voltaj ölçümü, Doğal veya simüle edilmiş güneş ışığı altında çok kavşaklı fotovoltaik cihazların akım voltaj özelliklerinin ölçülmesine ilişkin prosedürleri açıklar. Tek kristal fotovoltaik hücreler ya da hücre alt grupları dahil bütün fotovoltaik modüller için de uygulanabilir bir prosedürdür. Prensip olarak konsantre olmayan cihazlar için düşünülmüştür ancak konsantre çok kavşaklı fotovoltaik modüller için de uygulanabilir niteliktedir. IEC 60904-8-1 prosedüründe çok kavşaklı fotovoltaik modüllerin spektral tepkisi ile ilgili prosedürleri bulabilirsiniz.

IEC 60904-2:2015Fotovoltaik Referans Cihazlar için Prosedürler, Fotovoltaik referans cihazlarının sınıflandırılması, seçimi, ambalajlanması, işaretlenmesi, kalibrasyonu ve bakımına ilişkin şartları belirtir. Bu standart doğal ve simüle

edilmiş güneş ışığı altında fotovoltaik hücrelerin, modüllerin ve dizilerin elektriksel performansını belirlemek için kullanılan fotovoltaik referans cihazlarının gerekliliklerini kapsar.

IEC 60904-3:2016 Referans spektral ışıma oranı verileri ile karasal fotovoltaik (PV) güneş cihazları için ölçüm prensipleri, Fotovoltaik cihazların elektriksel çıktısını belirlemek için temel ölçüm prensiplerini tanımlar. Bu standartta verilen ilkeler, fotovoltaik cihazların güç ölçümlerini ortak bir referans karasal güneş spektral ışıma oranı dağılımı ile ilişkilendirmek üzere tasarlanmıştır. IEC 60904-9'un içerdiği spektral performans gereksinimlerine göre güneş simülatörlerini sınıflandırmak için referans karasal güneş spektral ışıma dağılımı bu standartta verilmektedir. Bu standartta yer alan ilkeler, hem doğal hem de simüle edilmiş güneş ışığında yapılan testleri kapsar.

IEC 60904-4:2009Referans güneş enerjisi cihazları için kalibrasyon izlenebilirliği oluşturma prosedürleri, Uluslar Arası Ölçü Birimleri(SI)'a göre de geçerli olan IEC 60904-2 prosedürü gereğince fotovoltaik referans cihazların prosedüründen bahsetmiştik. Bu standart ise fotovoltaik cihazların performansını ölçmek amacıyla doğal veya simüle edilmiş güneş ışığının ışımasını ölçmek için kullanılan fotovoltaik referans güneş cihazlarının kalibrasyon prosedürleri için geçerlidir. Dolayısıyla IEC 60904-1 ve IEC 60904-3 prosedürlerinin uygulanmasında gerekli olan fotovoltaik referans hücreyi temsil eden prosedürdür.

IEC 60904-5:2011Fotovoltaik (FV) cihazların eşdeğer hücre sıcaklığının (ECT) açık devre voltaj yöntemiyle belirlenmesi, Bir fotovoltaik cihazın(hücre, modül, bir dize modül) eş

değer hücre sıcaklığının belirlenmesi için tercih edilen yöntemin nominal hücre işletim özellikleri ile karşılaştırılmasındaki nedenleri açıklar. Nominal hücre işletim sıcaklığına karar verilmesi ve ölçülen I-V karakteristiklerin belirlenen test koşulları sıcaklıklarına dönüştürülmesi için belirlenmiş prosedürdür.

IEC 60904-6:1994 Referans güneş modülleri için prosedürler, Referans güneş modüllerinin seçimi, ambalajlanması, kalibrasyonu, markalanması ve bakımı için şartlar getirir. Bu, IEC 60904-2'yi tamamlamayı amaçlamaktadır.

IEC 60904-7:2008Fotovoltaik cihazların ölçümleri için spektral uyumsuzluk düzeltmesinin hesaplanması, Bir fotovoltaik cihazın ölçümü sırasında girilen ölçme aygıtının ışıma değerinde görülen yanlılık hatası için düzeltme prosedürüdür. Test spektrumu ve referans spektrum arasındaki uyumsuzluk ya da referans hücrenin spektrum tepkisi ile test modülü arasında oluşan uyumsuzluktan meydana gelen ölçüm hatası parametrelerini açıklar. Bu prosedür IEC 60904-10 standardına paralel spektrum tepkisini doğrulamak içindir. Tek kavşaklı fotovoltaik güneş cihazları için geçerli olan bu prosedürü çok kavşaklı güneş cihazları için de kullanmak mümkündür. Son revize halinde bu test metodunun ne zaman gerekli olup olmadığına dair revizeler mevcuttur.

IEC 60904-8-1:2017 Çok kavşaklı fotovoltaik modüllerin spektrum tepkisi ölçüm prosedürü, Çok kavşaklı fotovoltaik modüllerin spektrum tepisini ölçmek için gerekli prosedürleri içerir.

IEC 60904-9:2007 Güneş simülatörü performans Prosedürü, Fotovoltaik cihazların iç ortam güç ölçümlerinde kullanılan solar simülatörlerin

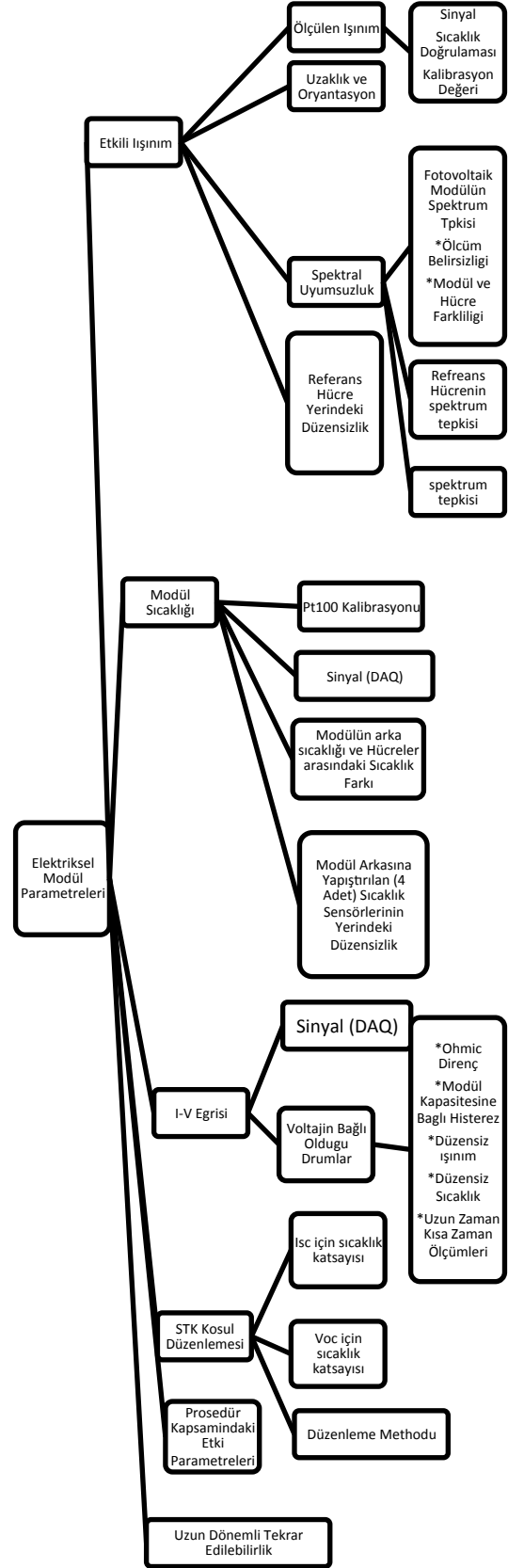
sınıflandırma prosedürünü açıklar. Spektral ışınım homojen bir şekilde dağılımının, test düzlemindeki ışınım farklılığı ve zamanlayıcının ışınım düzensizliği solar simülatörün A,B ya da C sınıfı için belli kriterleri oluşturur. Gerekli ölçüm metodolojilerinin oluşturulması adına gerekli prosedürler her sınıf solar simülatör için açıklanmıştır. Sınıflandırmada yapılan yeni tanımlar prosedürün revize haline eklenmiştir.

IEC 60904-10:2009 Lineer Ölçüm Metotları, Her hangi bir modül parametresinin test modül parametresine olan lineerlik derecesini açıklayan prosedürdür. Bu prosedürün öncelikle kalibrasyon laboratuvarları, modül üreticileri ve sistem tasarımcıları tarafından kullanılması amaçlanmıştır.

3.3. IEC 60891 Standardı; Fotovoltaik cihazların I-V karakteristiklerinde ölçülen sıcaklık ve ışık şiddeti düzeltmeleri için geliştirilmiş prosedürdür. Bu nedenle kullanılan tüm prosedürler için de referans faktörler belirleyen tüm standartları da kapsar. Fotovoltaik cihazların I-V ölçümü için gerekenler IEC 60904-1 bu anlamda ortaya koyulmuştur.

4. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN ANA NEDENLERİ

Belirsizliğe etki eden elektriksel modül parametrelerini tüm detayları ile ele aldığımızda Şekil 2. başlıklar altında toplamak mümkün olacaktır. Şekil 2. ölçüm ve değerlendirme süreci ile ilgili olarak belirsizliğe neden olan etki parametrelerini özetler ve nasıl/neden ortaya çıktığının yayılımını ana hatları ile gösterir. Ölçüm sürecinde ki tüm bu belirsizlikler I-V eğrisinden belirlenen parametrelerin yani sıra ışınım şiddetinin ve sıcaklığın modül üzerindeki etki parametre belirsizliklerinden de oluşur.



Şekil.2 Standard Test Koşullarında Güç Ölçümlerinde Belirsizlik Kaynakları

Ölçüm değerlendirme sürecinde belirsizliği vurgulayan iki ana aşama su şekilde oluşur: Birincisi, etkili ışınım ve ölçülen sıcaklık ile belirlenen I-V eğrisi Standart Test Koşullarına düzeltilir. İkincisi de düzeltilmiş I-V eğrisinden elektriksel modül parametreleri türetilir.[3]

Tüm bu kombine belirsizlikler CalLab hesaplama programına entegre edilmiş aşağıda belirtilen Denklem 3 sayesinde hesaplanır. Ölçüm denklemi (Denklem 1), girdi miktarındaki belirsizliğin belli bir değişim parametresinde çıkış miktarına nasıl yayılım gösterdiğini deneysel olarak ifade eder.

$$Y = Y_0 + c_1 \delta_1 + c_2 \delta_2 + \dots + c_n \delta_n$$

(Denklem 1)

Y ölçülen değer, X_i girdi değerleridir.

$$Y_0 = f(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{n,0})$$

$X_{1,0}, X_{2,0}$ ve $X_{n,0}$ nominal değerler,

$\delta_i = X_i - X_{i,0}$ girdi değerlerin dönüşümü, c_1 hassaslık katsayısıdır.

Denklem1’de belirtilen genel bir belirsizlik formülüdür. Kombine belirsizlikler için ise GUM(*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*)’da belirtilen bileşik belirsizlik yayılma yasasına göre belirlenmiş aşağıdaki denklem CalLab excel programına entegre edilmiş sekliyle kullanılmaktadır.

$$u_c^2(y) = (c_1 u_{x_1})^2 + (c_2 u_{x_2})^2 + \dots + (c_n u_{x_n})^2$$

(Denklem 2)

Denklem 2 sayesinde ölçülen ışınım, etkili ışınım ve I_{sc} , P_{mpp} vb. gibi tüm değerleri aynı anda girerek kombine belirsizlikler yöntemi ile net bir belirsizlik hesaplanır. Aynı zamanda bu formül gerçekte alınan belirsizlik örnekleri ve standartlaştırılmış ölçüm belirsizliklerini de eklemeye imkan sağlar.

Standard Test Koşulları dışında yapılan güç ölçümlerinde belirsizliğe etki parametreleri şunlardır:

- Spektral Uyumsuzluk Hatası [%]
- Referans Hücre ve Modül arasındaki ışınımın homojensizliği[%]
- Modül yüzeyi ve p-n jonksiyon arasındaki sıcaklık farkı sapmaları[%]
- Sıcaklık farkı [°C]
- Sıcaklığın ışınımına bağlı sapması[%]
- Histerezin P_{mpp} ’ye olan etkisi[%]

Bu çalışmada yukarıda belirtilen parametrelerin güç ölçümlerine belirsizlik değerleri incelenecektir.

5. BELİRSİZLİK TAHMİNİ

CalLab Fotovoltaik Modül kalibrasyon laboratuvarında yapılan belirsizlik hesaplaması“*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” (GUM) [4,5] "Ölçüm belirsizliğinin gösterilmesine ilişkin kılavuz" da belirtilen kurallara uygun olarak gerçekleştirilir. Kısacası, bir ölçüm sonucu belirsizliğini değerlendirmek ve ifade etmek için gerekli adımlar, GUM’ın 8. bölümünde şu şekilde özetlenmektedir :

(1) Belirsizlik hesaplaması için ölçüm değeri ile girdi miktarları arasındaki ilişkiyi ifade eden bir ölçüm denklemi formülize edilmelidir.

(2) Formül girdisi değerlerinin tüm tahmini belirsizlikleri girilir.

(3) Standart belirsizlikler de mutlaka formüle eklenmelidir.

(4) Belirsizlik tüm olası korelasyonları ile birlikte verilmelidir.

(5) Ölçüm sonucu, bu kombine ölçüm belirsizliği denklemi ile hesaplanacaktır.

(6) Kombine edilmiş standart belirsizlik, ölçüm denklem girdilerinin standart belirsizliklerinden ve bunların arasındaki korelasyonlarını da belirtmelidir.

(7) Genişletilmiş belirsizlik verilmeli ve

(8) Ölçüm sonucu tüm birleştirilen standart veya genişletilmiş belirsizlik ile birlikte sunulmalıdır.

6. KRİSTAL SİLİKON MODÜLLER İÇİN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ İNCELEMELERİ

6.1.Etkili Işınnın Belirsizliğe Etkisi

Solar Simülatör Spektruma Ait Uyumsuzluk Hataları (MisMatch/MM)

Bir solar simülatörün spektrum tepkisinden kaynaklanan hata belirsizlik hesaplamasında ne kadar pay alır deney sonuçlarında göreceğiz. Ancak bir fotovoltaiik modülün güç ölçümünün belirlenmesinde ki en önemli parametre ışınnıdır çünkü gerek güneş gerekse güneş simülatöründen elde ışınnı sayesinde ancak güç ölçümü yapılabilir. Bu ışınnın da belirsizliğine etki edenen önemli parametre ışınnın spektrum tepkisi hatası (MM) sırasıyla aşağıdaki formüller ile hesaplanır:

$$SR(\lambda) = \frac{q \lambda}{h c} EQE(\lambda) \left(\frac{A}{W} \right) \quad (\text{Denklem 3})$$

SR Spektrum Tepkisi, λ ışığın dalga boyu, q elemanter yük, h Plank sabiti, c ışık hızı ve $EQE(\lambda)$ dış kuantum verimliliğini ifade eder.

$E(\lambda)$ Gelen ışığın spektral ışınnını ifade eder. IEC 60904-3 standardına göre spektral uyumsuzluk faktörü MMsimülatör spektrumu ile referans spektrum farkının, referans hücrenin spektrum tepkisi ve test altındaki modülün spektrum tepkisi farkına oranı ile ifade edilir.

$$MM = \frac{J_{sc}^{RC,Eref} J_{sc}^{TC,ESim}}{J_{sc}^{RC,ESim} J_{sc}^{TC,Eref}} \Rightarrow$$

$$= \frac{\int SR_{RC}(\lambda) E_{Ref}(\lambda) d\lambda \int SR_{TC}(\lambda) E_{Sim}(\lambda) d\lambda}{\int SR_{RC}(\lambda) E_{Ref}(\lambda) d\lambda \int SR_{TC}(\lambda) E_{Ref}(\lambda) d\lambda}$$

(Denklem 4)

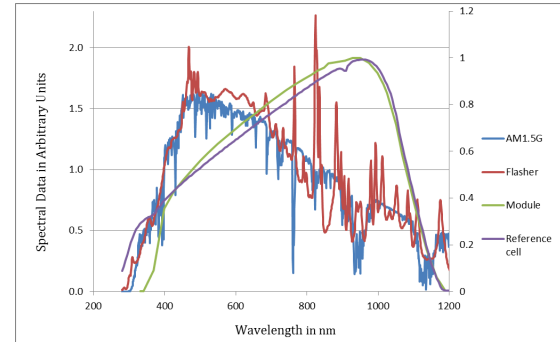
Bu formülde TC test hücreni, RC referans hücreyi, E_{ref} referans spektrumun referans ışınnını ve E_{sim} solar simülatör spektrumun spektral ışınnını gösterir.

MM hata faktörünü hesaplamaya dahil etmek doğru I_{sc} bulmak için gereklidir. Aşağıdaki formülde MM'in I_{sc} hesabında payını gösterilmiştir.

$$I_{sc} = \frac{Calib Val}{Ref Cell Sig} * I_{sc} module, ref spectrum * \frac{1}{MM}$$

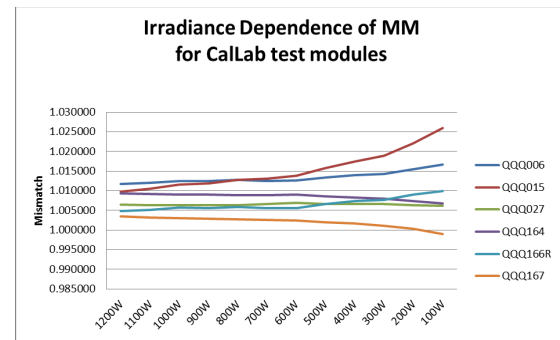
(Denklem 5)

$$I_{sc} = \int SR(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (\text{Denklem 6})$$



Şekil 3. Herhangi bir test modül üzerinde alınan Spektrum Tepkisi grafiği

Yukarıda ki şekilde A.M.1.5 G değeri IEC 60904-3 standardına göre belirlenmiştir.



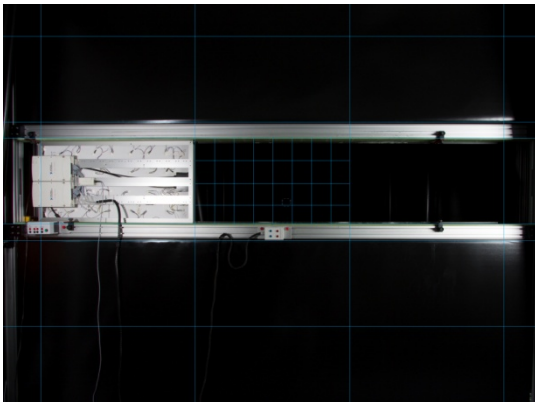
Şekil 4. Spektruma ait uyumsuzluk hatası farklı ışınnı noktaları için Callab test modülleri üzerinde şekildeki gibi incelenmiştir.

CalLab test modülleri üzerinde yapılan bu deneyde MM faktörü (Spektral Uyumsuzluk) 1.0 değerinde ölçüme eklenmiştir. Ve Mismatchölçüm belirsizliği yaklaşık olarak 2.6% değeri ile en fazla QQQ015 test modülünde gözlemlenmiştir. Test modülleri arasında QQQ015 modülü olabilecek en kötü belirsizlik sonucunu ortaya koyar bu yüzden en kötü durumlar için genişletilmiş belirsizlik dikkate alınmıştır.

6.2. Referans Hücre Ve Modül Arasındaki Işınmın Homojensizliği

Bu test prosedürünce önemli olan referans hücrenin ortalama ışınmın noktasına yakın bir noktaya monte edilmesidir. CalLab homojenlik testi için özel geliştirilmiş test modülünün her bir hücresinde bağlantı kutusu ile ışınmın ve sıcaklık kontrol bağlantısı vardır. Bu şekilde her bir hücrenin üzerine gelen ışınmın tek tek gözlemlenebilir. Ayrıca bu test uygulanırken modül sırasıyla 1. pozisyondan başlayıp 6. pozisyona kadar yerleştirilerek ölçülür. Ölçüm sırasında modül boyutlarının programda belirtilmesi ayrıca önemlidir.

3.x=0 y=2	6. x=1 y=2
2.x=0 y=1	5.x=1 y=1
1.x=0 y=0	4.x=1 y=0



Şekil.5 Homojenlik Test modülü ve Platformu

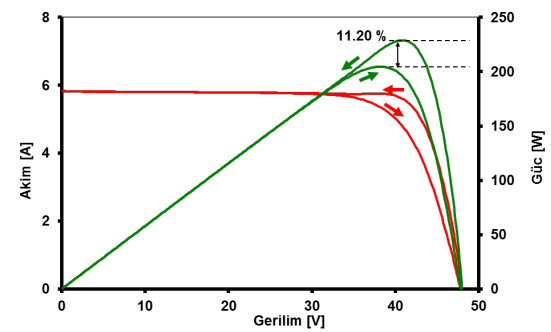
Modül pozisyonlara sırasıyla yerleştirildikten sonra 200 W/m², 500 W/m² ve 1000 W/m² için her biri 3 tekrardan oluşmak üzere ölçümler alınır. Yapılan bu ölçümler sırasında en yüksek belirsizlik değeri düşük ışınmında 200 W/m² için 1.36 değerinde belirlenmiştir.

201.57	201.98	202.53	203.59	201.5	202.35	202.81	201.81	201.9	201.32	201.79
201.59	201.93	202.24	201.73	202.26	202.65	203.13	202.25	202.18	201.07	199.28
202.19	201.43	203.5	202.81	203.01	202.24	204.02	202.92	201.21	201.69	199.68
203.17	203.16	202.83	203.11	203.74	203.7	203.34	203.61	202.68	200.88	199.82
202.39	201.92	202.39	202.73	202.8	202.34	202.73	203.12	202.48	201.5	201.08
202.32	201.99	203.5	202.56	202.59	201.95	203.28	202.71	202.29	202.37	199.71
202.69	202.04	203.55	202.61	202.67	201.63	202.59	202.87	202.46	202.55	200.06
201.96	202.8	203.71	202.99	201.52	202.28	202.91	201.36	203.05	203.06	201.28
204.02	203.64	203.88	203.97	201.43	201.73	201.84	201.9	202.88	202.49	201.1
203.63	203.24	203.34	202.67	202.19	202.45	202.32	202.55	203.38	202.77	201.29
203.88	201.9	203.88	203.72	202.55	201.52	202.93	203.19	202.68	203.69	202.03
203.45	202.42	202.45	203.58	203.43	203.03	202.36	203.95	204	202.6	202.09
202.28	201.28	202.41	203	202.22	201.52	201.57	202.92	202.35	202.27	201.88
200.99	200.48	202.29	201.95	201.67	201.36	202.42	202.32	201.91	202.72	201.44
201.66	200.88	202.07	201.81	202.15	201.33	202.51	202.84	202	202.74	201.51
199.89	200.37	201.8	202.79	201.17	201.61	202.14	201.52	202.41	202.92	201.77

Şekil 6. 200W/m² ışınmın verildiği zaman her bir hücrenin algıladığı ışınmın değerleri tablosu.

6.3.Modül Akım-Gerilim Grafiği Etkisi

Güç ölçümleri sırasında elektronik yük, I-V eğrisini iki kadrant üzerinden tarar (Hiç negatif akım meydana gelmez). Gerilim ve akım sırasıyla ± 250 V ve ± 20 A maksimum aralığında ölçülür. Kısa devre akımından (Isc) açık devre voltajına (Voc) ve açık devre voltajından (Voc) kısa devre akımına (Isc) doğru yapılan ileri ve geri kadrant taraması ölçümlerinde histeresiz sonuçları ortaya çıkar. Histeresiz modül davranışı olarak ele alınır daha çok n-tipi gibi yüksek kapasiteli modüllerde meydana gelir.



Şekil 7. XXX Marka bir Fotovoltaik Modülü için alınmış örnek histeresiz farkını gösteren Akım-Gerilim güç ölçüm grafiğidir.

$$Hyst = \frac{P_{mpp,backward} - P_{mpp,forward}}{P_{mpp,backward} + P_{mpp,forward}} * 100\%$$

(Denklemler3)

Yüksek kapasiteli modüller test koşullarında sıcaklık stabilizasyonu sağlamak için daha uzun ölçüm süresine ihtiyaç duyarlar. Standard test koşullarındaki ölçümlerde histeresiz minimize etmek için ölçüm süresi uzatılabilir. Ancak güç ölçümleri tek yönlü ölçümler olduğu için (single flash /forward) histerez etkisi daha çok gözlemlenebilir. Aksi halde bu ölçümleri bir modül için yapmak günler alır. Ölçümde flaşör şu şekilde çalışır. 15 °C 'den baslar 75 °C 'ye kadar her bir °C için sırasıyla ölçüm alınır. Örneğin 15.1 °C , 16.1°C 17.1°C 73°C, 74°C 75 °C gibi yani ölçüm alanında her bir derecede fotovoltaiik modül için sıcaklık stabilizasyonu sağlanır ve modül üzerine ışıınım gelir. Bundan dolayıdır ki güç ölçümü testleri yalnızca tek yönlüdür aksi halde ölçüm prosedürü gereği her bir modül için günleri alır.

Standard test koşullarında ise test edilen her bir modül için alınan I-V grafiği sırasında üç ayrı histerez ölçümü yapılır. Denklem 3'e göre histerezin 0,5 % 'den daha az olması için kesitli ölçümleri yapılır.(minimum 2 kesitten maksimum 18 kesite kadar ileri ve geri kadrar taraması ölçümleridir.)

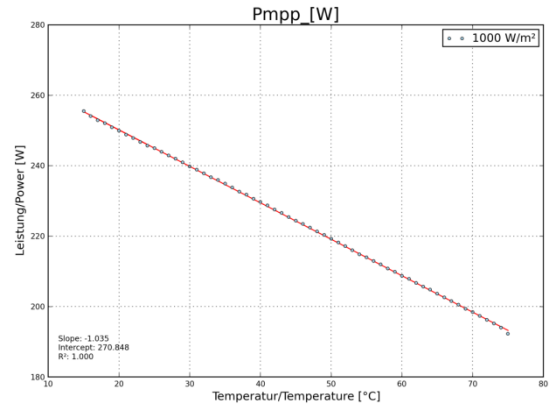
Her iki test koşulu için de elde edilen ham veriler Python programlama diline dayalı olan CalLab içi laboratuvar yazılımına dönüştürülür. Oluşturulan I-V eğrisi bu yazılım ile IEC 60891 Fotovoltaiik cihazların I-V karakteristiklerinde ölçülen sıcaklık ve ışık şiddeti düzeltmeleri prosedürü kapsamında sıcaklık ve ışıma şiddeti açısından Standart Test Koşullarına (STK) düzeltilir. Yazılım, elde edilen I-V eğrisinden modül parametrelerini I_{sc} , I_{mpp} , P_{mpp} , V_{mpp} , V_{oc} , FF ve verimliliği belirler.

Akim Gerilim grafiği oluşurken voltajın tarama hızına ilişkin kapasite verimi

kesit ölçümler ve histerez ölçümleri için maximum güç noktasında 0.5%'e minimize edilen belirsizlik değerindedir. Bu değer I-V grafiğindeki P_{mpp} noktasının hiç bir zaman gerçek güç değerinin $\pm 0.5\%$ değerinden farklı olmaması gerektiği gerçeğini de garantiye alır.

6.4.Modül Sıcaklık Katsayısının Belirsizliğe Etkisi

Fotovoltaiik modüllerin sıcaklık katsayıları ürünlerin giderek daha rekabetçi bir pazarda birbirinden ayrılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Öyle ki fotovoltaiik sistemlerde elektriksel performans fotovoltaiik modül tipine göre değiştiği gibi, üzerine düşen güneş ışığını elektriğe çevirme kapasitesi de verimliliğine bağlı fotovoltaiik modülün performans göstergesidir. Fotovoltaiik modüller yaklaşık 6-25% oranında üzerlerine düşen ışığı elektriğe çevirir bu orandan geriye kalan 75-94%'lük kısım ise modül içerisinde ısıya dönüşür. İşte bu noktada sıcaklık katsayısı performans ölçüm belirsizlikleri için en önemli parametrelerin başında gelir.



Şekil 8. Güç ölçümünün sıcaklığa bağlı değişim grafiği

Laboratuvarlar arası karşılaştırmalar maksimum gücün sıcaklık katsayılarına bağlı olarak ortalama $\pm 10-15\%$ veya daha büyük oranlarda sapmaları meydana getirdiğini gösterir. Ancak gerçekte yapılan ölçümlerde ki sapmalar

çoğunlukla belirsizlik tahminleriyle aynı değildir, bu da belirsizliğin genellikle düşük tahmin edildiğini göstermektedir. Aslında bu belirsizliğe etki parametrelerinin tanımlanması için geliştirilen yöntem I-V karakterizasyonu ile aynıdır. Modül sıcaklık katsayıları ölçümleri için 1000 W / m^2 'de ve farklı sıcaklıklar altında IV eğrileri (akım-voltaj) ölçülür.

IEC 60904-9 *solar simülatör performans prosedürleri* gereğince AAA sınıf bir simülatör tarafından ölçülen bu eğriler ve hesaplanan sıcaklık katsayıları yine IEC 60904-1 Ed.2 (2006-09) *akım voltaj karakteristik ölçümleri prosedürü* ve IEC 60891 Ed.2 (2009-12) *Kristal Silikon fotovoltaiik modüllerin ölçülen I-V eğrilerinin sıcaklık ve ışıınım düzenleme prosedürüne* göre doğrulanır. Belirlenmiş modül sıcaklık aralığı 1K interval için $25^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$ arasındadır. Ölçüm sırasında meydana gelebilecek ışıınım dalgalanmalarını düzeltmek için ölçüm sırasında ışıınım bir referans hücre tarafından kontrol edilir. Tüm bu sıcaklık katsayısı ölçümlerinin sonunda IEC 61853-1 basitleştirilmiş prosedürüne göre ölçümler şu şekilde belirlenir. İki ışıınım setinden alınan maksimum güç ve açık devre voltajı için göreceli sıcaklık katsayısı karşılaştırılır. Eğer alınan iki göreceli sıcaklık katsayısı değeri açık devre voltajı için 10% değerine ve maksimum güç değeri için de 15% değerine yakınsa elde edilen iki sıcaklık katsayısı ölçüm sonucunda belirten tabloda kullanılabilir. Daha fazla ise her bir set için yeniden ölçüm yapılmaz. Sıcaklık katsayısı sıcaklık artış ve düşüşünde alınır. Sıcaklığın homojen bir şekilde belirlenmesi için modül arkasına yapııştırılan 4 farklı Pt100 sıcaklık sensörü ile denetlenir. Bu özellikleri dikkate alarak yapmış olduğumuz aşağıda özellikleri verilen XXX013 ve

XXX021 modülü için sıcaklık katsayısı ölçüm grafikleri verilmiştir.

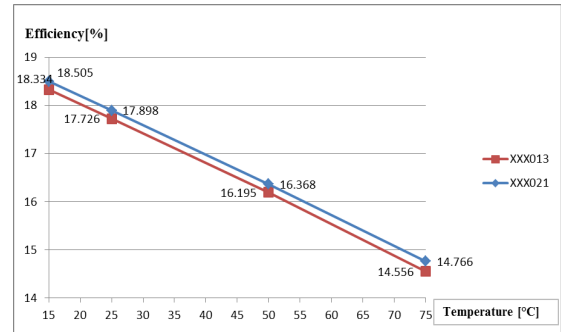
Tablo.1 XXX013 (Histereli) Modülü sıcaklık katsayısı değerleri

Sıcaklık	Pmpp [W]	Verimlilik [%]
15 ° C	300.685	18.334
25 ° C	290.711	17.726
50 ° C	265.604	16.195
75 ° C	238.723	14.556
Bağıl SıcKat[%/K]	-0.355	-0.355

Tablo.2 XXX021 (Histeresiz) Modülü için ölçüm sonuçları

Sıcaklık	Pmpp [W]	Verimlilik [%]
15 ° C	303.479	18.505
25 ° C	293.521	17.898
50 ° C	268.431	16.368
75 ° C	242.159	14.766
Bağıl SıcKat[%/K]	-0.348	-0.348

Görüldüğü gibi her zaman histerezli modül ölçümlerinde sıcaklık katsayısı daha küçük olacaktır.



Şekil 9. Farklı sıcaklık noktaları için XXX021 (histere var) ve XXX013 (histere yok) modülünün sıcaklığa bağlı verimlilik[%] grafiği

Aynı tip iki modülü karşılaştırdığımız zaman her iki modülde de sıcaklığın

artması ile birlikte güç ve verimde gözlemlenen düşüş aşıkardır. XXX013 modülü için belirtilen bağıl sıcaklık yüzdesi 35.5% bu değer güç eğrisinin sıcaklığın artması ile gösterdiği reaksiyonun sonucu grafiğin azalan lineer eğim yüzdesidir. Bu değer XXX021 modülü için 34.8 %değerindedir. Her iki modülün sıcak katsayı karşılaştırıldığında ise sapma değeri yaklaşık 1.30 [%]

değerindedir.

6.5.Doluluk Çarpanı (Fill Factor / FF)

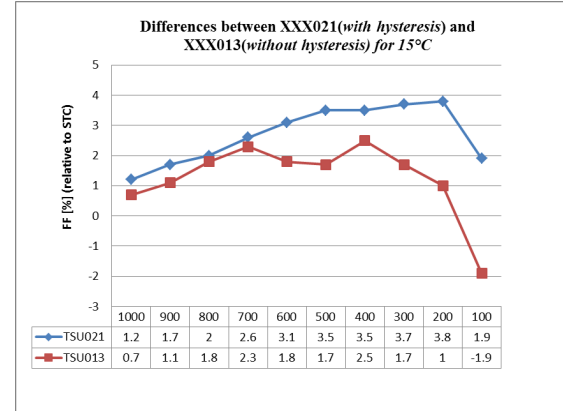
Bir fotovoltaiik modülün belli bir ışınlm altında akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mpp} \times I_{mpp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ 'ye oranı olarak tanımlanır. Yani en yüksek çıkış gücünün, açık devre gerilimi ile kısa devre elektrik akımı çarpımına oranı doluluk oranını verir. Doluluk çarpanı genellikle bir fotovoltaiik modülün elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılır. Dolu çarpanı (fill factor, FF): Daha çok "FF" kısaltmasıyla bilinir. Grafiksel olarak, FF, güneş cihazı I-V eğrisinin "köşeliği" ölçüsüdür ve I-V eğrisine sığacak en büyük dikdörtgenin alanıdır. [8]

$$FF[\%] = \frac{P_{max}}{P_t} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (\text{Denklem 5})$$

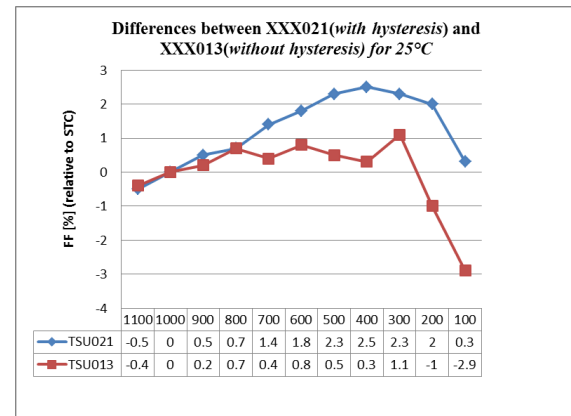
eşitliği ile hesaplanır.

Güç ölçümlerindeki belirsizliği anlamının en belirgin yolu fotovoltaiik modülün doluluk çarpanı (FF) oranındaki ölçüm sapmalarına bakmaktır. Çünkü FF değeri maximum gücün t anındaki güce oranıdır. I-V eğrisinin en önemli belirsizlik parametrelerinden olan histerezin bu anlamda dolum oranına (FF) etkisini incelemek adına 100-1100 Watt/m² ışınlm aralığında farklı sabit sıcaklık noktaları için sırasıyla ve XXX021 (histerezli) ve XXX013 (histerezsiz)

modüllerinin FF [%] ölçümleri yapılmıştır. Bu deneyleri sırasıyla 15°C ve 25 °C sıcaklık için yaparak standart test koşulları dışındaki durumlar için de sıcaklık parametrelerinin farklı ışınlmlar üzerinde fotovoltaiik modül gücünü nasıl etkilediğini araştırdık.



Şekil 10. 15 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerez var) ve XXX 013 (histerez yok) dolum oranının ışınlma bağı grafiği.

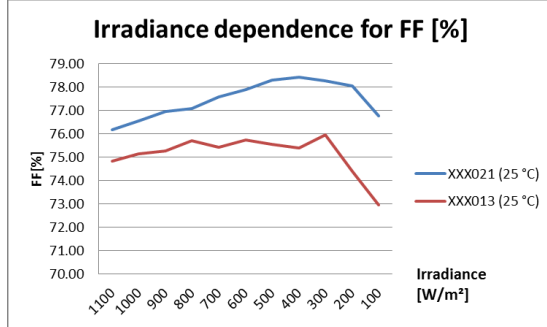


Şekil 11. 25 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerez var) ve XXX 013 (histerez yok) dolum oranının ışınlma bağı grafiği.

Histerezli olan grafik doğru ölçüm sonucu verir. Şekil 11 'de görüldüğü üzere 25 °C sıcaklık altında her iki modülde 1000 W/m² ışınlm altında aynı FF[%] oranına sahip iken 100 W/m² 'ye doğru histerezli ve histerezsiz grafik için ışınlımın giderek azalması Doluluk Oranı(FF) farkının azalarak arttığını gösteriyor. Buradaki mavi ile belirtilen yani histerezli olan ölçüm olması gereken "doğru ölçüm" olarak kabul

edirken, kırmızı ölçüm ise histerezin de olmayışı ile daha az FF yüzdesine sahip sapma gösteren ölçümdür.

Histerez direkt olarak modül gücünü etkiler, modül gücündeki değişim ise en doğru FF[%] değişimi ile gözlemlenir.



Sekil 12. 25°C sıcaklık altında XXX021 (histerez var) ve XXX013 (histerez yok) modülü için ışınlamaya bağlı verimlilik [%] grafiği

Şekil.12 histerezin modül verimliliği direkt etkilediğini açıkça gösteren bir grafik. 25 °C altında yapılan bu ölçümde her iki modül içimde hesaplanan standart sapma değerine iki modül için de verimlilik değeri arasındaki fark yaklaşık 2 % değerindedir.

Pmpp değerindeki belirsizlik histereze göre ifade edilir. Pmpp değerini anlamının en doğru yolu da yine FF oranına bakmaktır. Bu anlamda aynı tip iki modülün histerezli olup olmayışına bağlı olarak yapılan doluluk oranı(FF) ölçümlerine göre Pmpp(Maksimum güç) noktasındaki fark, düşük ışınlamalar altında yapılan ölçüm belirsizliği yüzdesini verir. Histerez olmayan tek yönlü ölçümlerde normalden daha fazla belirsizlik değeri elde edildiği gerçeğini yansıtır.

7. SONUÇ

Standart Test Koşulları altında yapılan ölçümlerin gerçekçi çalışma koşulları altında modül davranışını tanımlamak için yeterli olmadığını vurgulamak adına yapılan bu çalışmada kapsamlı olarak aynı tip modüller üzerinde histerezli ve histerezsiz ölçümler

yapılmıştır. Histerezin 0.5%'den yüksek olması belirsizliği arttıran parametrelerdendir. Özellikle Spektrum Uyuşmazlığı hatası olarak bilinen (Mismatch/MM) ve dolun çarpanının (FF) histerezli ve histerezsiz olan ölçümlerdeki belirsizliğe olan etkileri detaylandırılmıştır.

Fotovoltaik modüllerin güç ölçümlerine etki parametrelerini incelerken özellikle ışınlamın homojenliği, spektral uyumsuzluk hatasının (MM) dikkate alınması ve ölçümün histerezli olması ölçüm doğruluğu açısından yol gösterici ve kalitesini ortaya koyacaktır. Burada sunulan kapsamlı ölçüm süreci kristal silikon modülleri için farklı şartlar altında ve histerezli ölçümler için belirsizlik etki parametrelerinin incelenmesine örnek model oluşturacaktır.

Ölçüm hassasiyeti bilimsel öneminin yanında bir projenin bankaca kabul edilebilirliği adına doğru verim tahmini ve minimum finansal risk açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- [1] IEC 60904-9 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] C. R. Osterwald, et al., "The world photovoltaic scale: An international reference cell calibration program," in Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim, California, USA, 1997, pp. 1209-1212.
- [3] D. Dirnberger, "Uncertainty in PV Module Measurement - Part I," Calibration of Crystalline and Thin Film Modules, 2013.
- [4] ISO/IEC Guide 98-3, "Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995),"

International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008.

[5] JCGM 100, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2008.

[6] S. Winter, et al., "New laser-DSR facility at PTB: concept for a next generation high accuracy primary calibration facility," in Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Hamburg, Germany, 2011, pp. 3466-3468.

[7] S. Winter, et al., "Primary reference cell calibration at the PTB based on an Improved DSR facility," in Proc. 16th EU PVSEC, Glasgow, United Kingdom, 2000.

[8] "<http://www.pveducation.org/pvcdrom/fill-factor-0>"

[9] IEC 61853-1 Ed. 1.0, "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating," ed: International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2011.

[10] D. Dirnberger, "Uncertainty in PV Module Measurement - Part II," To be published, 2013.

[11] C. R. Osterwald, et al., "The world photovoltaic scale: An international reference cell calibration program," in Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim, California, USA, 1997, pp. 1209-1212.

[12] ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E) : Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), 2008

[13] Emery, K. A.; Osterwald, C. R.; Wells, C. V. : Uncertainty analysis of photovoltaic efficiency measurements. In : Proceedings of the 19th IEEE

Photovoltaic Specialists Conference. 19th IEEE PVSC. New Orleans, Louisiana, USA, 4-8 May, pp. 153-159, 1987.

[14] INTERNATIONAL STANDARD, ISBN 978-2-88912-301-8; Edition 1.0 2011-01, Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating; Part:1 Irradiance and temperature performance measurements and power rating, 2011.

[15] INTERNATIONAL STANDARD, ISBN 978-2-8322-3584-3; Edition 1.0 2016-09, Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating; Part:2 Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements, 2016.

[16] Hohl-Ebinger and W. Warta, "Uncertainty of the spectral mismatch correction factor in STC measurements on photovoltaic devices," Progr. Photovoltaic, vol. 19, Aug. 2011.