T.C.

EGE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN GÜÇ ÖLÇÜMÜ BELİRSİZLİKLERİNİN ANALİZİ

Gonca DÜLGER BEDELOĞLU

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Mete ÇUBUKÇU

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Gonca DÜLGER BEDELOĞLU tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan "Fotovoltaik Modüllerin Güç Ölçümü Belirsizliklerinin Analizi" başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 19/08/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri: **İmza**

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Ceylan ZAFER .....

Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Banu KÖZ .....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Fotovoltaik Modüllerin Güç Ölçümü Belirsizliklerinin Analizi" başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

19/08/2019

İmzası

Adı-Soyadı

Gonca DÜLGER BEDELOĞLU

ÖZET

FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN GÜÇ ÖLÇÜMÜ BELİRSİZLİKLERİNİN ANALİZİ

DÜLGER BEDELOĞLU, Gonca

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Mete ÇUBUKÇU
Ağustos 2019, 96 sayfa

Fotovoltaik (FV) modüllerin güç karakteristiklerinden bahsedilirken, standart şartlar altındaki (1.000 W/m² ışınım şiddeti, 25°C sıcaklık ve 1,5 AM hava kütlesi) güç değerleri verilir. Gerçek saha koşulları ise farklıdır. Dolayısıyla, bir FV modülün farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık koşullarında çalışma karakteristiklerinin incelenmesi, o modülün kalitesine yönelik çok daha doğru bilgi verecektir.

Farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık noktaları altında FV modüllerin güç çıkışı ölçümleri, IEC 61853 nolu uluslararası standardına uygun olarak yapılabilmektedir. Bu standarda uygun yapılacak testler, FV modülün verim hesaplamasında da kullanılmaktadır. Verim hesaplaması hassasiyeti, güç oranının ölçüm belirsizliğine bağlı olduğundan, hangi koşulların belirsizliğe etki ettiğini bilmek önemlidir.

Standart şartlar altında yapılan belirsizlik hesaplaması, zaten bazı akretide laboratuvarlar tarafından detaylı analiz edilmiştir. Diğer şartlarda ise, ancak kabaca bir tahminle belirsizlik hesaplaması öngörülmüştür. Bu tez çalışmasında, 100-1.100 W/m^2 ışınım şiddeti aralığı ve 15-75°C arasında sıcaklık noktaları için AAA sınıfı bir güneş simülatörü ile standart şartlar içinde ve dışında ölçümler yapılarak, hangi parametrelerin belirsizlik hesaplamasına etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı ışınım şiddeti seviyelerindeki sıcaklık noktaları için spektrum kararlılığı, ışınım şiddeti ve sıcaklık homojenliği gibi ölçüm karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca, bu ölçümler için silisyum temelli farklı tip FV modüllerin histerezis özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan ölçümlerin ayrıntılı belirsizlik hesaplaması da yapılmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak, güç ölçümleri belirsizliğinde hangi faktörlerin ne derece etkili olduğu irdelenebilmektedir.

Anahtar sözcükler: Verim Hesabı, Ölçüm Belirsizliği, Güç Ölçümleri, Fotovoltaik Modül.

ABSTRACT

UNCERTAINTY ANALYSIS FOR POWER RATING MEASUREMENT OF PHOTOVOLTAIC MODULES

DÜLGER BEDELOĞLU, Gonca

MSc in Solar Energy
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mete ÇUBUKÇU
August 2019, 96 pages

While determining power characteristic of PV modules, standart test conditions (1,000 W/m^2 solar irradiance, 25°C temperature ve 1,5 AM) are always used. But, the real conditions may be different on site. Therefore, analyzing of a PV module's performance characteristics on different irradiance and temperature levels can give exact information about the quality of PV modules.

The power rating measurements of PV modules under different irradiance intensity and temperature points may be verified according to IEC 61853 standard. Test results according to this international standard are also used for the efficiency calculation. Therefore, it's important to know which conditions effects the measurement uncertainty.

The uncertainty calculation for power rating measurements under standard test conditions has already been analyzed detailly by accredited laboratories. For the other test conditions, the uncertainty is estimated roughly. At this thesis study, power rating tests are measured by AAA class solar simulator in 100-1,100 W/ m^2 irradiance and 15-75°C temperature level. Additionaly, measurement characteristics (spectrum and stability of irradiance, irradiance intensity level and temperature homogeneity etc.) were analyzed for different irradiance intensity levels. Besides, hysteresis specifications of the different kind of silisium based PV modules were analyzed under these measurements. The detailed uncertainty measurement of the tests was calculated, too. According to these results, the parameters effecting the power rating measurements are analyzed.

Keywords: Yield Calculation, Measurement Uncertainty, Power Rating Measurements, PV Module.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sırasında akredite bir laboratuvardan tüm ölçümler ile ilgili destek alınmıştır. Bu süreçte yapılmış ve teze konu olan ölçümler IEC standartları göz önünde bulundurularak Standart Test Koşulları ve Standart Test Koşulları dışında değerlendirilmiştir. Ölçümler sırasında kullanılan farklı teknoloji FV modüller ile ilgili tüm etiket değerleri, marka ve ürün kodları tarafımca gizli tutulacaktır ve tez kapsamında herhangi bir markayı belli eden ifadeler kullanılmayacaktır. Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim akademik süreçte laboratuvar desteği almamı sağlayan ve teorik katkılarıyla yüksek lisans tezimi şekillendiren değerli tez danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Mete ÇUBUKÇU'ya sonusz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii

ABSTRACT ix

ÖNSÖZ xi

İÇİNDEKİLER xiii

ŞEKİLLER DİZİNİ xv

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam) xvi

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam) xvii

ÇİZELGELER DİZİNİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xix

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam) xx

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam) xxi

1. GİRİŞ 1

1.1. Fotovoltaik Modüllerde Güç Ölçümü 1

1.2. Ölçüm Ekipmanları 3

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7

2.1. Ölçüm Standartları 29

2.1.1. IEC 61853 Standardı 30

İÇİNDEKİLER(devam)

Sayfa

2.1.2. IEC 60904 Standardı 31

2.1.3. IEC 60891 Standardı 34

3. ÖLÇÜM YÖNTEM ve GEREÇLERİ 35

3.1. I-V Karakterizasyon Sistemi 35

3.2. Belirsizlik Tahmini 38

3.3. Etkin Işınımın Belirsizliğe Etkisi 39

3.3.1. Güneş simülatörü spektrumuna ait uyumsuzluk hataları 39

3.3.2. Referans hücre ve FV modül arasındaki ışınımın homojensizliği 42

3.4. Modül Akım-Gerilim Grafiği Etkisi 46

3.4. Modül Sıcaklık Katsayısının Belirsizliğe Etkisi 54

3.4.1. Modül arka yüzey ile pn eklemi arasındaki sıcaklık sapması 57

3.5. Doluluk Çarpanı 60

4. SONUÇ VE TARTIŞMA 64

KAYNAKLAR DİZİNİ 68

TEŞEKKÜRLER 73

ÖZGEÇMİŞ 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

1.1. Pasan 3b güneş simülatörü. 4

1.2. Referans hücre. 6

2.1. I-V grafiğinde ileri ve geri tarama histerisiz kayıpları grafiği (M. Herman et al., 2012). 9

2.2. Araştırma altındaki üç ayrı FV hücrenin hata ve I-V eğrisi tarama zamanı (M. Herman et al., 2012). 10

2.3. Genişletilmiş belirsizliği ile PTB'de ölçülen 2 x 2 cm^2'lik bir referans hücrenin tipik spektral tepkisi (J. H. Ebinger et al., 2011). 12

2.4. FV modüllerin sevkiyat öncesi ve sonrası elektrolüminesans testi. 14

2.5. Voc ve Pmpp ortalama sapma değeri arasındaki ilişki (H. Liu et al., 2013). 15

2.6. Darbeli ışınım aralıklarının zamana bağlı ışınım şiddeti grafiği(M. Shimotomai et al., 2006). 17

2.7. C-Si FV modüller için ölçüm belirisizliği sonuçların özeti. (E.Salisa et al., 2017). 20

2.8. Yıllar içerisinde ölçülen P_{mpp} ile etiket değerindeki P_{mpp} arasındaki farkı. (J.Lopez et al., 2018). 23

2.9. Hesaplanan uyumsuzluk değerine karşı APE (Ortalama Foton Enerjisi), geniş bant ışınımı ve değerin kendisinde göreceli belirsizlik (D.Dirnberger et al., 2015). 26

2.10. Etkin ışınım, 10 FV modülün ortalaması ile elde edilen Gef. (J. Manuel et al., 2017). 28

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

2.11. 10 adet FV modülün ortalaması ile elde edilen modül sıcaklığı ve bu ortalama ile her modül arasındaki farklar(J. Manuel et al., 2017).....28

3.1. STC'de güç ölçümlerinde belirsizlik kaynakları (D. Dirnberger ve U. Kräling, 2013).....36

3.2. Bir test modül üzerinde alınan spektrum tepkisi grafiği.....40

3.3. Farklı ışınım noktaları için farklı test modülleri spektrumlarına ait uyumsuzluk hatası. 41

3.4. Homojenlik test özel modülü ve platformu. 43

3.5. Program arayüzü. 44

3.6. Pozisyonların seçilmesi. 44

3.7. Ölçüm sonucu. 45

3.8. 1.000 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri. 45

3.9. 500 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri. 46

3.10. 200 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri. 46

3.11. Gerilim kaynağı ölçere dayalı olarak yüksek kapasiteli bir FV modül için I – V ölçüm sisteminin şematik diyagramı 48

3.12. Isc'den Voc'ye (ileri yönde) I –V eğrisi ölçüm işlemi parametrelerinin şeması. 48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

3.13 Ölçüm gecikme süresi değiştirilerek alınan ölçümler sonucu histerisiz kayıpları sonucu (Q.Gao et al, 2018). 50

3.14. X Marka FV modül için örnek histerisiz kayıpları gösteren akım-gerilim ve güç ölçüm grafiği.....51

3.15. HALM güneş simülatöründe sıcaklığa bağlı histerisiz kayıpları 51

3.16. HALM güneş simülatöründe sıcaklığa bağlı histerisiz kayıpları 52

3.17. 295 Wp tek c-si FV modül için 1.000 W/m^2 'de sıcaklığa bağlı histerezis hatası değişimi.....53

3.18. 300 Wp tek c-si FV modül için 1.000 W/m^2 'de sıcaklığa bağlı histerezis hatası değişimi.....53

3.19. Güç ölçümünün sıcaklığa bağlı değişim grafiği.....54

3.20. Farklı sıcaklık noktaları için XXX021 (histerezis var) ve XXX013 (histerezis yok) FV modülünün sıcaklığa bağlı verimlilik [%] grafiği. 57

3.21. 15 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerezis hatası var) ve XXX 013 (histerezis hatası yok) doluluk çarpanının ışınıma bağlı grafiği. 61

3.22. 25 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerezis hatası var) ve XXX 013 (histerezis hatası yok) doluluk çarpanının ışınıma bağlı grafiği. 61

3.23. 25°C sıcaklık altında XXX021 (histerezis hatası var) ve XXX013 (histerezis hatası yok) FV modülü için ışınımına bağlı verimlilik [%] grafiği. 62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge Sayfa

2.1. Farklı FV teknolojileri için genişletilmiş belirsizlik(D.Dirnberger et al., 2013). 7

2.2. Ölçme yöntemine göre sınıflandırma(M. Shimotomai et al., 2006). 16

2.3. Çalışmada ele alınan FV modül teknolojileri. (E.Salisa et al., 2017)....19

2.4. Son 20 yılda FV modül çıktı gücü arasındaki farktan maliyetin tahmini ve toplam maliyete ilişkin örnekler (J.Lopez et al., 2018). 24

3.1. Homojenlik test modülü ve platform pozisyonları. 42

3.2. Ölçüm süresi parametreleri.....49

3.3. XXX013 (Histerezis hatası yok) FV modül sıcaklığa bağlı P_{mpp} ve verimlilik değerleri. 56

3.4. XXX021(Histerezis hatası var) FV modül sıcaklığa bağlı Pmpp ve verimlilik değerleri 56

3.5 XXX013 FV modülü için farklı sıcaklık noktalarındaki güç ölçümü ve STC'ye göre oranı 58

3.6 XXX021 FV modülü için farklı sıcaklık noktalarındaki güç ölçümü ve STC'ye göre oranı 59

4.1. Güç değerlendirme ölçümleri için belirsizlik tahminleri.....66

4.2. Belirsizliğin etki ettiği I-V parametreleri. 66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
AA	Alternatif akım
AM	Hava kütlesi
APE	Ortalama foton enerjisi
a-Si	Amorf silisyum modüller
c	Işık hızı
C	Sıcaklık
CdTe	Kadmiyum tellür
CIGS	Bakır indiyum galyum diselenid
CIS	Bakır indiyum selenid
DA	Doğru akım
DakkS	Almanya akreditasyon birimi
DAQ	Sıcaklık sinyali toplama analizi
EL	Elektrolüminesans testi
EQE (λ)	Dış kuantum verimliliği
EVA	Etilen Vinil Asetat
FF	Doluluk çarpanı (Fill Factor)
FV	Fotovoltaik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Gref	Referans ışınım
GUM	Ölçümlerde belirsizliğin ifadesi için rehber
h	Plank sabiti
I	Akım (Amper)
Iph	FV modülde toplanan akım (A)
Ipv	FV modül nominal akımı (A)
mc-Si	Çok kristalli silisyum
NMI	Alman Doğa ve Tıp Bilimleri Enstitüsü
pc-Si	Çoklu kristal silisyum
P_{STC}	STC koşullarındaki güç (W_p)
PTB	Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü
q	Elektron yükü = 1.6×10^{-19} C
SR	Spektral tepki
STC	Standart test koşulları
T	Modül çalışma sıcaklığı (Kelvin)
Tr	Referans sıcaklık = 298 K
UC	Belirsizlik sabiti
V	Gerilim (Volt)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Vpv	FV modül nominal gerilimi (V)
WPVS	Uluslararası referans hücre kalibrasyon standardı
λ	Işığın dalga boyu
HIT	Farklı eklem katmanlı ince film FV modül
ε	Histerisiz kayıpları

1. GİRİŞ

Ölçüm belirsizliğinin en aza indirgenmesi, çeşitli bilim dallarında her zaman önemli bir hedef olmuştur. Öyle ki düşük belirsizlik, bir ölçümün kalitesini ortaya koyan önemli parametrelerdendir. Fotovoltaik (FV) sistem yatırımcıları ve yeni hücre teknolojileri üzerinde çalışan bilim insanları için güç ölçümünde düşük belirsizlik öncelikli olarak beklenir. Proje kredilendiren bankalar ve FV enerji sistemleri yatırımcıları, hassas ölçüm hesaplarından kaynaklanan belirsizliğe göre maksimum enerji verimliliği tahminine ve ileri zaman dilimi içerisinde yatırım üzerinde minimum finansal riski sağlamaya kadar önemli parametreleri belirlemeyi hedeflemektedir. Ölçüm sonuçlarındaki belirsizliğin bilinmesi, bilimsel gelişmeye katkı sağladığı gibi özellikle yatırımcı açısından projenin finansal riskini net ortaya koymaktadır. Genel olarak belirtilen ölçüm belirsizliği hesabı, STC (Standart Test Koşulları) ortamında 1.000 W/m² , 25 °C ve 1,5 AM hava kütlesi ışınım spektrumunda ortaya konulan değerlerdir. Ancak önemli olan, gerçek şartlar altında bir FV modülün güç ölçümlerinde gözlemlenen belirsizlik parametre ve değerleridir. Literatür taraması yapıldığında, bugün birçok laboratuvar yüksek sıcaklık ve düşük ışınım şiddeti değerleri için FV modüllerin güç ölçümlerinde net bir belirsizlik bildirememiştir. Bu tez için yapılan kalibrasyon ölçümleri sırasında; markadan bağımsız farklı teknolojilerde, FV test kalite modülleri kullanılarak, farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık noktaları için belirsizlik parametreleri detaylı incelenmiş, tüm ölçüm prosedürleri geniş kapsamlı olarak ele alınmış ve özellikle histerisiz kayıpları olan ölçümlerde güç ölçüm belirsizliği üzerindeki etkileri saptanmıştır.

1.1. Fotovoltaik Modüllerde Güç Ölçümü

Ölçüm belirsizliğini belirlemek için ölçüm sırasında ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin de içinde bulunduğu doğruluk aralığı belirlenir, istatistiksel ve matematik metotlara ve şüpheye dayalı bir tahmin hesaplaması yapılır. Gerek basınç gerek sıcaklık gerekse güç ölçümlerinde yapılan her bir ölçüm; belli bir aralık içinde ifade edilerek, ölçümün bu aralıkta olduğuna dair belli bir güven derecesine göre belirtilir.

Kalibrasyon ve deney laboratuvarlarının ölçüm kalitesini belirleyen en önemli unsur, düşük ölçüm belirsizliği değeridir. Bu nedenledir ki, bir FV modülün kalibrasyonlarını yapacak laboratuvarların seçiminde ölçüm belirsizliği önemli bir karar destek unsurudur.

Mühendislik, danışmanlık, kurulum firmaları yanında en çok da yatırımcıların merakla talep ettiği güç ölçümleri dünya standardalarında akretide olmuş laboratuvarlarda karşılaştırılmalı referans hücreler gözetiminde yapılmaktadır. Standard test koşulları ve kalite güvenceleriyle her bir farklı teknolojideki FV modül için geliştirilmiş ölçüm yöntemleriyle laboratuvar ortamında ya da sahada birebir ekiplerle referans hücreler de baz alınarak güç ölçümleri yapılmaktadır.

Ölçümlerde en önemli faktör, aynı belirsizlikte tekrarlanabilir ve olabildiğince en düşük belirsizlik değerinde yapılabilmesidir. FV modüllerin etiket ve veri sayfalarına dayalı şartnamelerdeki güveni arttırmasından dolayı, üretim sırasında ve sonrasında düşük ölçüm belirsizliğinin olması FV modül üreticisi için de bir avantajdır.

FV modül üreticisi için düşük ölçüm belirsizliği ürettiği ürünün kalitesini ortaya koyarken, yatırımcı için de üretimden ve sonrasındaki yıpranmalara bağlı kaynaklanabilecek verim düşüşlerinde finansal riski en aza indirgemiş olmaktadır.

FV modüller için güç ölçümü belirsizliklerinin analizi hem sahada hem de laboratuvar ortamında yapılabilmektedir. Her 1 MWp'lik bir güneş enerjisi santrali için laboratuvar ortamında yapılacak olan güç ölçümü testleri için FV modüller sahadan rastgele 8 adet seçilmesi önerilmektedir. Dikkatle paketlenmiş olması ve güvenli bir ulaşım aşamalarından sonra ölçüm yapılacak olan laboratuvara iletilmesi beklenir. Laboratuvar ortamında standart koşullarda en az iki gün bekletilen ve optimum sıcaklığa getirilen modüller istenilen test için hazır hale getirilir. Testler yapılmadan önce önemli bir adım da modül camlarının laboratuvar çalışanları tarafından dezenfekte bir ilaç ile temizlenmesidir. Bu aşamayı da geçtikten sonra, hangi tip ölçüm yapılacak ise modüller ilgili güneş simalatörlerinin bulunduğu ölçüm odalarına alınır ve ölçümler yapılır.

Dünya'da güç ve spektral tepki ölçümünü gerçekleştiren birçok laboratuvar bulunur. Bunlardan en bilinen bazıları şunlardır:

- Avrupa Güneş Araştırma Komisyonu Merkezi (ESTI), (Ispra, İtalya).
- Fraunhofer ISE Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü (Callab, Almanya).
- Ulusal İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST) (Tsukuba, Japonya).
- Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) (Golden, CO, ABD).

Her bir laboratuvarın standart test koşullarındaki güç ve spektral tepki ölçümü belirsizliği birbirinden farklıdır. Bu farklılık ölçümlerde kullanılan güneş simülatörünün markasından ışınım kalitesi değer sınıfına kadar birçok etken parametresine bağlı olarak değişir. Ayrıca genel olarak yapılan testler arasında, Elektroışıma görüntü testleri, ışık kaynaklı bozulmalara bağlı testler (LID), standart şartlar ve dışındaki güç değerlendirilmesi, düşük güneş ışınım şiddetindeki performans, ayrıntılı görsel denetim, potansiyel kaynaklı bozulma (PID) testleri, ısıl çevrim testi, salyangoz etkisine duyarlılık testi gibi testleri isimlendirmek mümkün olacaktır.

Tüm bu kalibrasyon testleri modül teknolojilerine göre farklılık gösterecektir. Güç ölçümleri yapılan farklı tip FV teknolojilerini şu şekilde özetleyebiliriz: Çoklu kristal silisyum, tek kristal silisyum, amorf silisyum modüller (a-Si), yarıiletken bileşikli FV hücreler GaAs, Cd kadmüyum tellür, bakır indiyum selenid (CIS), bakır indiyum galyum diselenid (CIGS). Yeni trendler arasında olan çift yönlü (bifacial) modüller de kimi akretide laboratuvarlarca testleri yapılmaktadır.

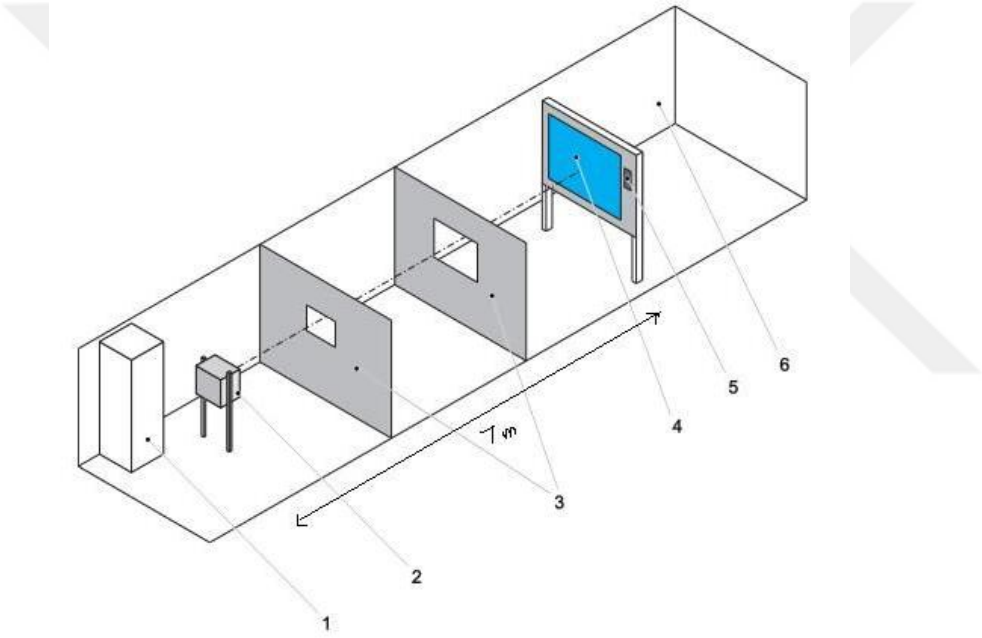
Bu tez kapsamında kullanılan tüm ölçüm ekipmaları, detaylıca ele alınarak özellikleri belirtilmiş ve her biri için belirsizlik faktörleri ölçümler sırasında göz önünde bulundurulmuştur. Başlıca en önemli ekipman, güneş simülatörü ve referans hücredir.

1.2. Ölçüm Ekipmanları

Bu tez çalışmasında FV modüllerin kalibrasyon ölçümleri için iki farklı güneş simülatörü kullanımıştır. Hassas ölçümler ve darbeli ışınım şiddetleri için ölçümlerde kullanılan güneş simülatörü Şekil 1.1.'de belirtilen "Pasan 3b Sun Sim" modeli güneş simülatörüdür. Farklı ışınım şiddeti aralıkları ve sıcaklık noktaları altında güç ölçümleri ve akım-gerilim karakterizasyonu için IEC 60904-9 "Güneş

simülatörü performans prosedürü" gereğince sınıflandırılmış olup AAA kalitesinde bir ışık kaynağına sahiptir. Ölçüm süresi yaklaşık olarak 80 ms'dir. Bu sürede, ışık kaynağının zamana bağlı ölçülen belirsizliği yaklaşık olarak % 0,5 'lik bir değere sahiptir.

2,1 x 1,3 m²'den küçük FV modül boyutları için ise alansal eşitsizlikten kaynaklı ölçüm belirsizliği % 1'den az değerdedir. Farklı teknoloji modüller için rahatlıkla karakterizasyonu sağlanan fotovoltaik güç ölçümlerinde simülatör ışınımı, akretide bir laboratuvar tarafından üretilen referans bir hücre ile tüm ölçümler sırasında denetlenir. Bu ölçümler karanlık bir odada gerçekleşir ve simülatör ile FV modül arasındaki mesafe 8 metredir.



Şekil 1.1. Pasan 3b güneş simülatörü.

1- Işık kaynağının kabini

2- Dış lamba

3- Diyagram

4- Test edilen modül

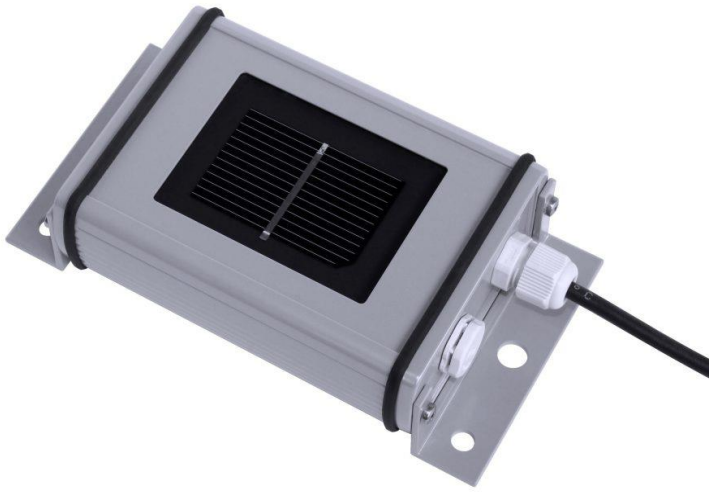
5- Referans hücre

6- Siyah duvarlar

PASAN Simülatörü düşük ışınım şiddeti ölçümleri, performans ölçümleri ve spektral uyumsuzluk hatalarının da dahil edilebildiği tüm hassas ölçümleri gerçekleştirebildiği gibi ölçüm süreleri yaklaşık 0,5- 1 saat aralığındadır. PASAN güneş simülatöründe farklı ışınım şiddeti aralıklarında (100- 1.100 W/m^2) hassas ölçümler yapılırken, ışık kaynağının önüne ışınım şiddeti aralıkları farklı filtreler takılarak aralıklar değiştirilir ve her bir ışınım şiddeti değerinde belirlenen sıcaklığa gelmesi beklenerek ölçümler gerçekleştirilmiştir.

HALM güneş simülatöründe ise simülatör ve ölçüm düzlemi arasındaki mesafe 1,5 m'dir. Bu güneş simülatöründe 3 m x 2 m boyutlarına kadar modüllerin ölçümleri farklı ışınım şiddeti aralıklarında gerçekleşir. HALM güneş simülatöründe spektral uyumsuzluktan kaynaklı belirsizlik % 12,5' den küçüktür, alansal eşitsizlikten kaynaklı belirsizlik % 1'den küçük ve ölçüm sırasında kararlı olma durumu % 0,5'den küçüktür. HALM güneş simülatöründe bu nedenlerden kaynaklı olarak hassas ölçüm gerektirmeyen ölçümlerin yapılması tercih edilmiştir.

WPVS, FV hücre 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 sabit bir alüminyum bir gövde içerisindedir. Boyutları 70 x 79 x 17 mm^3'dir. Kolay montaj edilebilir. Pt100 sıcaklık sensörü (4 telli) entegre edilebilir olarak üretilen hücrelerdir. Yeni hücrelerde negatif uyarılmış silisyum bazlı materyal kullanılmış, bu sayede farklı ışınım şiddeti aralığında bile yüksek hassasiyet başarıyla entegre edilmiş ve referans hücrelerin konfigürasyonu optimize edilebilmiştir. Ölçümlerde kullanılan referans hücreler, DakkS (Federal Almanya Cumhuriyeti için Ulusal Akreditasyon Kurumu) tarafından ve PTB (Almanya Uluslararası Metroloji Enstitüsü) tarafından denetlenmiştir.



Şekil 1.2. Referans hücre.

Bu tez çalışması sırasında destek alınan FV modül kalibrasyon laboratuvarında iki ayrı güneş simülatöründen ölçümler alınmıştır. Son teknoloji olan PASAN simülatöründe, hassas ölçümlerin özel ışınım şiddeti aralıkları altındaki karakterizasyonu ölçümleri yapılırken, HALM simülatöründe ise sıcaklığa bağlı olarak FV modül verimliliği ve akım-gerilim grafikleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

➢ D.Dirnberger ve U.Kräling yapmış oldukları kapsamlı çalışmada Standard Test Koşullarında güç ölçüm belirsizliklerini Çizelge 2. 1'de ana başlıklar altında toplamayı başarmıştur. Başlıklara önem verirken hangi laboratuvar standardları altında bu ölçümleri yaptıklarını açıklamışlardır. Ölçüm ve değerlendirme süreçlerine ait neden nasıl ilişkisini ortaya koymuşlar ve ölçüm sürecindeki bu belirsizlikler I-V eğrisinden belirlenen parametrelerin yanında ışınım şiddetinin ve sıcaklığın FV modül üzerindeki etkilerinden kaynaklı meydana gelebileceğini açıklamışlardır. Standard Test Koşulları dışında yapılan güç ölçümlerinde belirsizliğe etki parametrelerini ise şu şekilde sunmuşlardır:

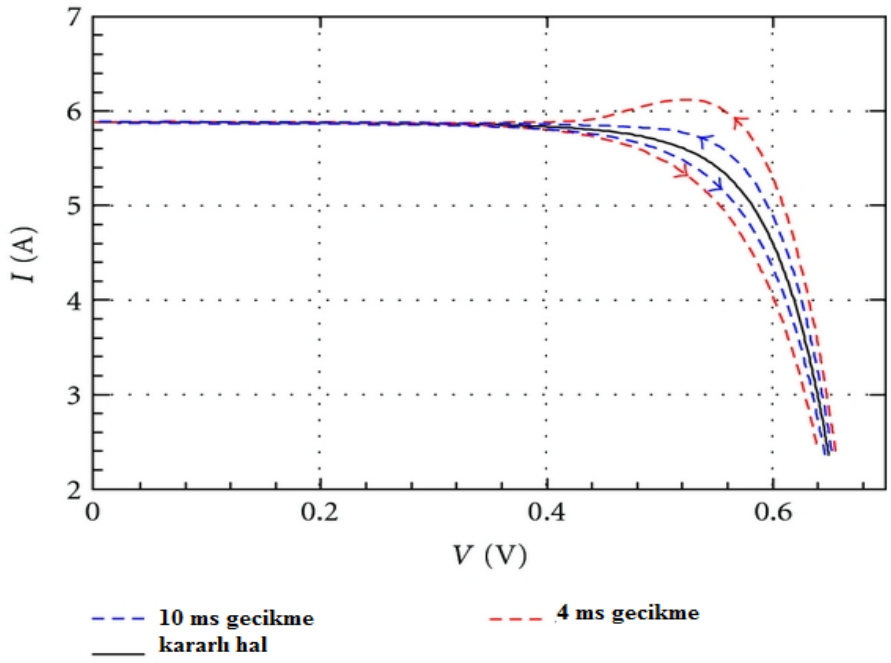
Spektral uyumsuzluk hatası [%], referans hücre ve modül arasındaki ışınımın homojensizliği [%], modül yüzeyi ve PN eklemi arasındaki sıcaklık farkı sapmaları [%], sıcaklık farkı [°C], sıcaklığın ışınıma bağlı sapması [%], histerezis Pmpp`ye olan etkisi [%] detaylıca ele almışlardır.

Çizelge 2.1. Farklı FV teknolojileri için genişletilmiş belirsizlik(D.Dirnberger et al., 2013).

Genişletilmiş Belirsizlik (k=2, %)	**I_{sc}**	**I_{mpp}**	**V_{oc}**	**V_{mpp}**	**P_{mpp}**	**FF**
Kristal silisyum Modüller	1,3	1,7	0,6	1,2	**1,6**	1,2
Kadmiyum tellür	2,5	2,8	0,7	1,4	2,9	1,7
Amorf silikon	1,4	1,8	0,6	1,3	1,8	1,2
CIGS	Genel bir belirsizlik değeri yok					

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler, kalibrasyon laboratuvarının kalite güvence sistemini ortaya koymaktadır. Üç yıllık bir dönemde üç haftada bir yapılan ve kalite güvence sisteminin bir parçası olarak gerçekleştirilen bir dizi ölçüm sonunda elde edilen belirsizlik değerlerinin kararlı ve azalan yönde olmasına dikkat edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada, kristal silisyum modül kalibrasyonu için P_{mpp} % 1,6 ve I_{sc} için % 1,3 olarak en iyi durum belirsizliğini ortaya koymaktadır (D.Dirnberger et al., 2013).

- M. Herman ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalar sonucu yüksek verimli FV hücre ve modüllerin, geçici güç ölçüm tepkilerinin sınırlı güçlü kapasitif bir karakter hızıyla sonuçlandığını ortaya koyulmuştur. Çok hızlı ölçülen bir I-V eğrisi ölçümü, FV modüllerin dahili yüksek kapasiteleri nedeniyle önemli bir hataya sebep olabilir. Bu çalışmada, ölçülen bir FV hücre veya modülünün I-V eğrisi tarama süresi ve farklı ışınım şiddeti seviyesi altında I-V eğri hataları analiz edilmiştir. I-V eğrisinden kaynaklı parametrelerin açık devre geriliminden yola çıkılarak belirlenmesine yönelik genişletilmiş bir yöntem sunulmakta ve sonuçlar ile onaylanmaktadır. Genişletilmiş modelin ve geliştirilen parametre ayırma yönteminin FV modüllere uygulanabilirliği kanıtlanmış ve doğrulanmıştır. Genişletilmiş modelde SPICE simulasyon programı ile I-V eğrisi tarama süresi bağımlılığına ve I-V eğrisinin histerezis etkisine karşı eğri hatasını elde etmek için çalışılmıştır. Optimum tarama süresinin belirlenmesi ele alınır ve son olarak I-V eğrisi tarama süresi ve hata üzerindeki ışınım şiddeti seviyesinin etkisi ortaya çıkar. Bu yöntemde üç farklı FV hücre tipiyle ile çalışılmıştır.

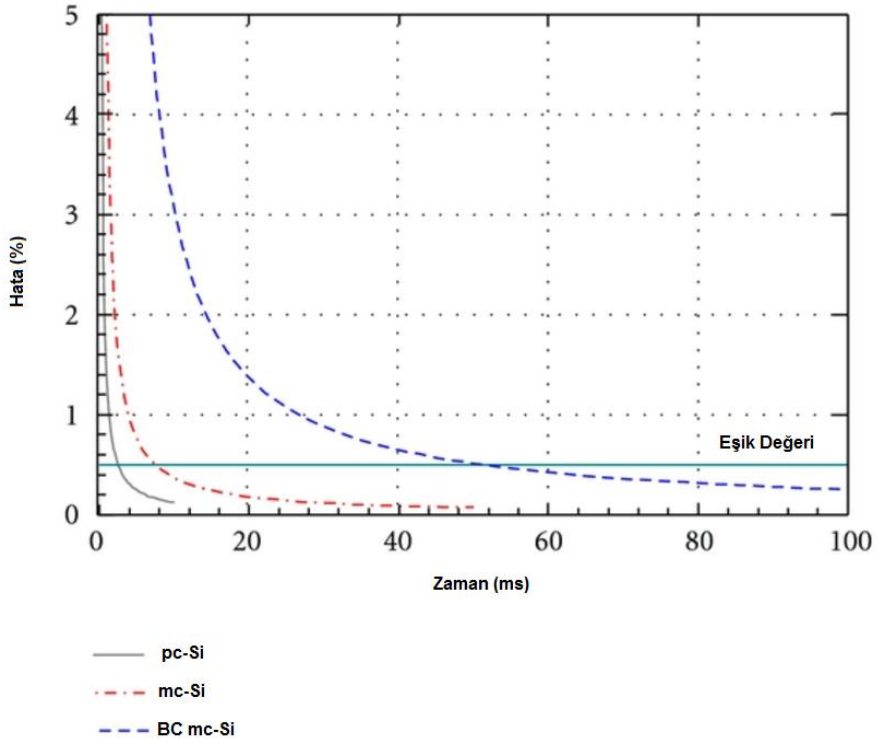


Şekil 2.1. I-V grafiğinde ileri ve geri tarama histerisiz kayıpları grafiği (M. Herman et al., 2012).

M.Herman ve arkadaşlarına göre en uygun tarama süresi mümkün olduğunca uzun olmalı, ancak önceden tanımlanmış dinamik bir hatayı I-V eğrisinin altında tutulacak kadar da uzun olmaması gerektiği de ortaya koyulmuştur. I-V eğrisi taraması (ileri yönde) kısa devre akımından açık devre gerilimine ve (geri yönde) açık devre geriliminden kısa devre akımına doğru olarak gerçekleşir. Bu tarama sırasında I-V eğrisinde ileri yönde yetersiz değerlendirme ve ters yönde aşırı değerlendirme sonucu histerisiz kayıpları görülmüştür.

M. Herman ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada devre simulasyonu olan SPICE programını kullanarak MATLAB'da modellenen I-V eğrisi tarama süresi tayinine göre sayısal ölçümler ve süre gelen hataları ele almıştır. Maksimum tölere edilebilir ve önceden tanımlanmış hata eşiğinin belirlenmesi sürecinde, diğer I-V eğrisi hatalarının yanı sıra gerekli tarama süresinin I-V eğrisine oranı dikkate alınmıştır. Uzman laboratuarlar I-V eğrisi ölçüm belirsizliklerinin % 1,6'dan % 3'e çıkarabildiğini bildirmiştir. Ayrıca Şekil 1.2' de, düşük hata eşiklerinde çok uzun tarama sürelerine yol açan, tarama süresine karşı hata payında bir düşüş

gözlemlenmiştir. Diğer belirsizliklerin altında en az üç kat fazla kalmak ve çok uzun tarama sürelerinden kaçınmak için (Şekil 1.2), önceden tanımlanmış hata eşiği % 0,5 olarak ayarlanmıştır. Öngörülen optimum tarama süreleri sırasıyla pc-Si, mc-Si ve çok katlı (BC) mc-Si FV hücreler için 2,2 ms, 7,3 ms ve 43,8 ms'dir.



Şekil 2.2. Araştırma altındaki üç ayrı FV hücrenin hata ve I-V eğrisi tarama zamanı (M. Herman et al., 2012).

Her üç ayrı FV hücre için I-V eğrisi tarama hatası testi altında belli bir ışınım şiddeti değerinde hata / ışınım bağımlılığı için tersine sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Azalan ışınım şiddeti ile birlikte azalan zaman sabiti olmasına rağmen, hata ve optimal tarama süresi sonuç olarak kısmi derecede artmıştır. Ters eğim trendi ölçümü göreceli hata değeri hesaplamasından ortaya çıkarmıştır. Gerilim ve akımın hata değeri etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, zaman sabitinin ışınımla birlikte azalmasına rağmen toplam hata değeri artmıştır.

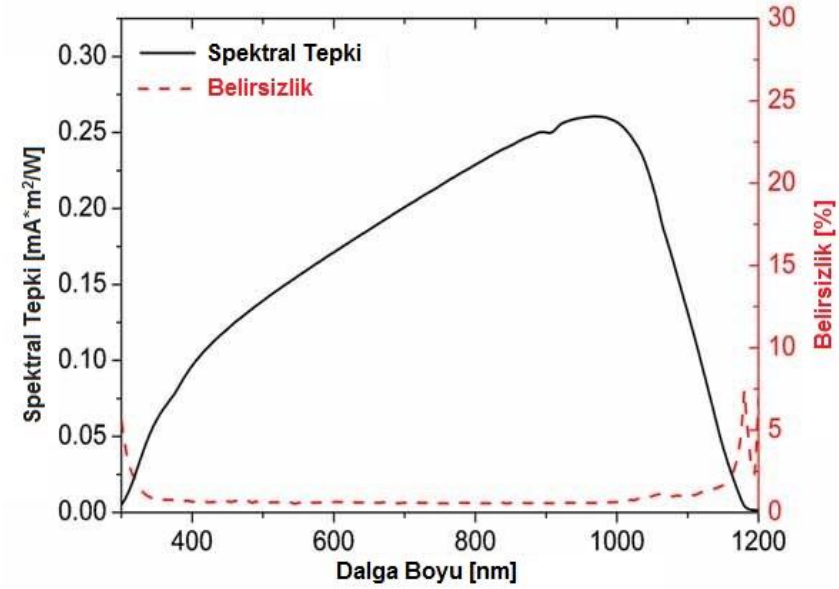
FV dizilerin kapasite ve zaman sabiti olmasına rağmen düşen ışınım şiddetiyle birlikte hatanın giderek artışı tespit edilmiştir. Test edilen çoklu kristal silisyum FV hücrelerin histerisiz kayıpları hata eşiği % 0,5 olarak belirlenmiştir.

Çok yüksek hassasiyetli büyük kapasiteli FV modül ölçümlerinde bu hata payı daha da artabilir. En yüksek düzey ışımada ya en düşük düzey ışımada ki tarama zamanı ya da eşik hatası toleransı dikkate alınmalıdır (M. Herman et al., 2012).

- J. H. Ebinger ve W. Warta'nın ele almış olduğu çalışmada FV modüllerin güç tespiti, ölçüm yapan cihazın güç çıkışına büyük ölçüde bağlı olduğu yönündedir. FV modülerin üretim hattında yer alan araştırma test laboratuarlarında, yapay güneş ışığı altında belirlenir. Güneş simülatörlerinde de olması zorunlu olan kalibrasyon zinciri esas olarak ölçümlerin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler. Ölçüm koşulları IEC 60904 standart serilerinde tanımlanmıştır. Standart test koşullarının en önemli kısmı, gerçek güneş ışığının belirli bir spektrum dağılımında, güneş simülatöründe tanımlanmasıdır. Işık kaynağının spektrumunun standart spektrumdan kaçınılmaz sapmaları, bir spektral uyumsuzluk faktörü olarak ele alınmıştır. Bu makalede, yüksek spektral çözünürlükte karar verilen girdi parametrelerinin belirsizlik hesaplamaları için rastgeleleştirme yöntemi önerilmiştir. Güneş simülatörlerindeki spektral dağılımın çeşitliliğine ve FV hücrenin spektral tepkilerinin farklılığına göre elde edilen sonuçları diğer simülatörler için de genelleştirmek mümkündür. Bir duyarlılık analizi, önemli dalga boyu bölgelerini ortaya çıkarır ve böylece simülatör spektrumlarının sistematik optimizasyonuna ve referans hücrelerin ölçüm düzeneğinde konumunun seçimine izin verir.

Simülatörden çıkan ışınım şiddeti ile FV modülün spektral cevabının tam olarak belirlenmemiş ve doğrusal olmayışı, dalga boyu ile sürekli olarak değişen hatalara neden olacaktır. Referans hücrenin veya FV modüldeki test ölçüm ekipmanının sıcaklık sapması zamanla sürekli değişimlere neden olur ve bu nedenle ölçüm işlemi için gereken süre boyunca dalga boyu ile ilişkili hataları meydana getirir.

Bu etkilerin kombinasyonu, komşu dalga boyları için güçlü bir şekilde ilişkili olan genel belirsizliklerle sonuçlanır. Bu, standard test koşulları altında sadece I_{sc}'nin doğruluğu değil (spektral yanıttan hesaplanan tablolandırılmış standart spektruma entegre), aynı zamanda mevcut spektral çözümlenmiş veriler için de oldukça doğrudur.



Şekil 2.3. Genişletilmiş belirsizliği ile PTB'de ölçülen 2 x 2 cm^2'lik bir referans hücrenin tipik spektral tepkisi (J. H. Ebinger et al., 2011).

Alman Doğa ve Tıp Bilimleri Enstitüsü (NMI)'sünde son derece gelişmiş ölçüm prosedürüleri nedeniyle bu belirsizlik çok azdır.

Sonuç olarak J. H. Ebinger ve W. Warta'nın ortaya koyduğu çalışmada spektral uyumsuzluk faktörü, altı farklı FV hücre kombinasyonu için sürekli değişen spektral dağılımlarla hesaplanmıştır. Burada geliştirilen rastgeleleştirme analizi, çok sayıda spektral uyumsuzluk faktörünün Gauss dağılımına yol açmaktadır ki, bu analiz dağılımın girdi miktarlarının belirgin olmayan belirsizliği ile ilişkilidir (J. H. Ebinger et al., 2011).

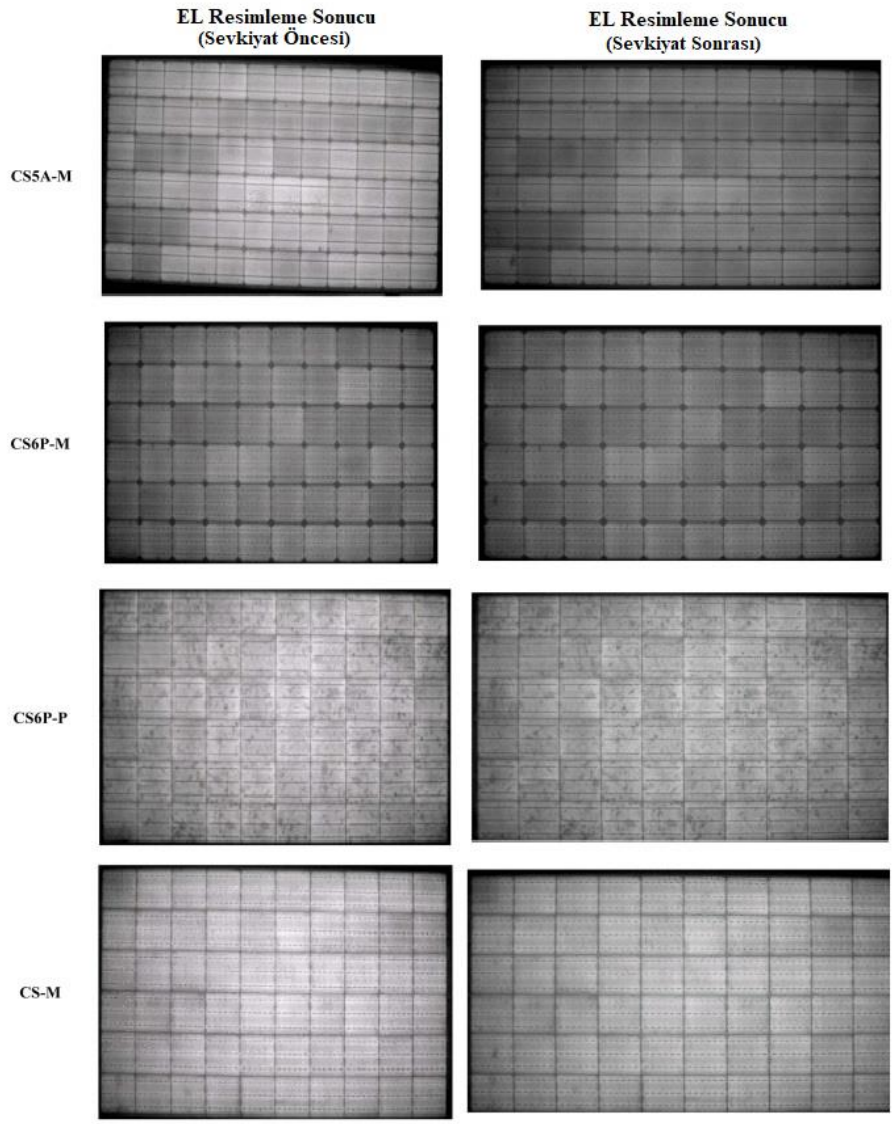
- H.Mullejans ve arkadaşlarının yapmış olduğu kapsamlı çalışmada FV modüller için izlenebilirlik ölçümleri ve çeşitli transfer adımlarını gerçekleştirmek için kullanılan yöntemler detaylıca açıklanmaktadır. Ölçüm belirsizlikleri, Avrupa Güneş Enerjisi Test Enstitüsünün (ESTI) akreditasyonuna göre ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. FV modül kalibrasyonunda genel belirsizliğe etki eden faktörler izlenebilirlik zinciri içinde kritik olarak analiz edilmiştir. En önemli faktörün, birincil referans hücrenin kalibrasyonundaki belirsizlik olduğu öngörülmüştür.

Genel ölçüm belirsizliği ESTI kalibrasyon laboratuvarında üretilmiş olan bir referans hücre kullanıldığında azalmıştır. FV modüllerin maksimum güç ölçümlerinde, genişletilmiş belirsizlik değeri % ±2,6'dan % ±2'nin altına düşer. FV

teknolojileri için belirsizliğin daha da azaltılması ve çeşitli ölçümler için en iyi kalibrasyon stratejisinin kapsamında öneriler bu makalede örnek formülizasyonlarla yapılmıştır.

FV modül kalibrasyonunun izlenebilirliği ve ilişkili ESTI ölçüm prosedürlerindeki belirsizlikler, diğer laboratuvar ve kurulumlar için ölçüm metedolojisine kolayca adapte edilebilir şekilde sunulmuştur. En büyük katkısı, referans hücre belirsizliği WPVS için baskın olan izlenebilirliği ve referans hücre setinin ana bileşenlerini (optiksel belirsizlikle birlikte) doğrudan izlenebilir halde sunmasıdır. FV modüllerinin maksimum gücünün belirlenmesi sırasındaki belirsizliği tanımlayarak, ±% 2,6'dan ±% 2'ye düşürülmüştür. İnce film teknolojileri kalibrasyonu için aynı teknolojinin çalışma referansı, genel olarak belirsizliği azaltmaya yardımcı olabileceği öngörülmüştür. Spektral uyumsuzluk bileşeni olan çok belirsizlik değeri gerçek bir kalibrasyonda ihmal edilebilir. Genel ölçüm belirsizliğini daha fazla azaltmak için güneş simülatöründeki optiksel belirsizliğin en aza indirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, dış mekân doğal güneş ışığının homojenliği her zaman tercih sebebidir. Sıcaklık genel belirsizliğe en büyük katkı sağlar, ikincisi ise FV modülün ölçümde monte edildiği laboratuvar ortamın optimum sıcaklığıdır (H. Mullejans et al., 2009).

- H.Liu , D.Wen ve arkadaşları Çin'de FV sistem kurulumunun hızlı ilerlemesiyle birlikte, FV performans ve kalibrasyon laboratuvarlarının ve akreditasyon kuruluşlarının test raporları için performans değerlendirmesinin giderek daha önemli bir rol oynadığını düşünmektedir. FV modül üreticilerinin üretim kalitesini anlamak için kalibrasyon laboratuvarlarında yapılan elektriksel ölçümlerle performans parametrelerindeki sapma ile izlenebilirliğini doğrulamak için karşılaştırmalı ölçümlere ihtiyaç duyulur. Bu makaledeki karşılaştırma programının amacı, Standart Test Koşulları (STC) altında tekli kristal silisyum (sc-Si) ve çoklu kristal silisyum (mc-Si) modüllerinin I-V özelliklerini ölçmektir. Örnek olarak üç sc-Si modülü ve bir adet mc-Si modülü seçilmiştir. FV modüller bu deneye katılan her laboratuara gönderilmek üzere özel tahta sandıklarda paketlenmiştir. Sevkiyat sırasında titreşimden etkilenmemesi için özenle paketlenmesine rağmen sevkiyattan önce ve sonra laboratuvarda elektrolüminesans (EL) testi yapılmıştır ve sonuçları aşağıdaki gibi sunmuşlardır.

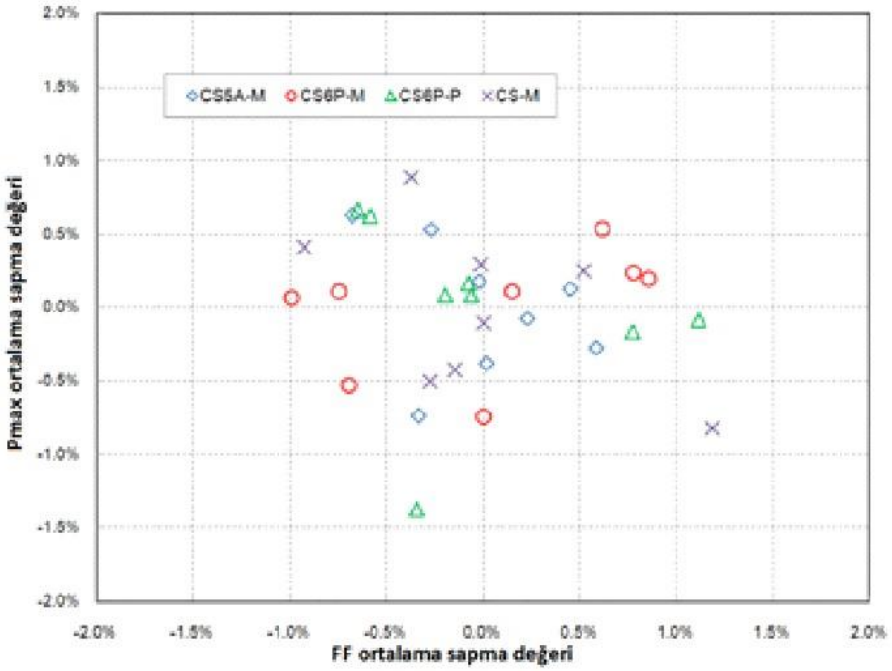


Şekil 2.4. FV modüllerin sevkiyat öncesi ve sonrası elektrolüminesans testi.

Şekil 2.5.'de gösterilen EL testinde dört ayrı FV modül üzerinde ele alınmıştır. Bunlardan üç tanesi tek kristal silisyum bir tanesi çoklu kristal silisyum modüldür. Her bir modüle aşağıdaki gibi bir etiket ismi verilmiştir;

- CS5A-M – tek kristal silisyum FV modül
- CS6P-M - tek kristal silisyum FV modül
- CS-M - tek kristal silisyum FV modül
- CS6P-P -çoklu kristal silisyum FV modül

FF doluluk çarpanı sonuçları, Şekil 2.6'da gösterilmektedir. FF verilerinin çoğu, ±% 1 aralığındadır. FF verileri, I-V eğrisinden elde edilen karakterizasyon, dört sensörlü sıcaklık bağlantısı ve güneş simülatöründen gelen ışınımın tek biçimliliği ile ilgilidir. FF'nin, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi P_{mpp} ile ilişkili olmadığı açıktır. Işınımın tek biçimliliği % 5 veya daha büyük olduğunda, FF ve I-V ölçüm ünitesi arasında yakın bir ilişki vardır.



Şekil 2.5. Voc ve Pmpp ortalama sapma değeri arasındaki ilişki (H. Liu et al., 2013).

FV modüller için bu karşılaştırmalı ölçüm programına Çin'de sekiz adet FV modül kalibrasyon laboratuvarı katılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, I_{sc} diziliminin çoğunluğunun ±% 2 aralığında sapma gösterdiğini ve Pmpp ±1 % referans FV modül arasında düştüğünü ve izlenebilirlik yönteminin I_{sc} ve P_{mpp} farkına neden olan ana faktör olduğunu göstermektedir. Tüm katılımcı laboratuvarların ölçüm belirsizliğini vermediği fark edilmiştir. Yakın gelecekte, ince film FV modülü için de laboratuvarlar arası karşılaştırmalı ölçüm programı, spektral uyumsuzluk düzeltme gibi ölçüm prosedürlerini geliştirmek ve net bir belirsizlik değerlendirmesi yapmak için hazırlanmaktadır (H. Liu et al., 2013).

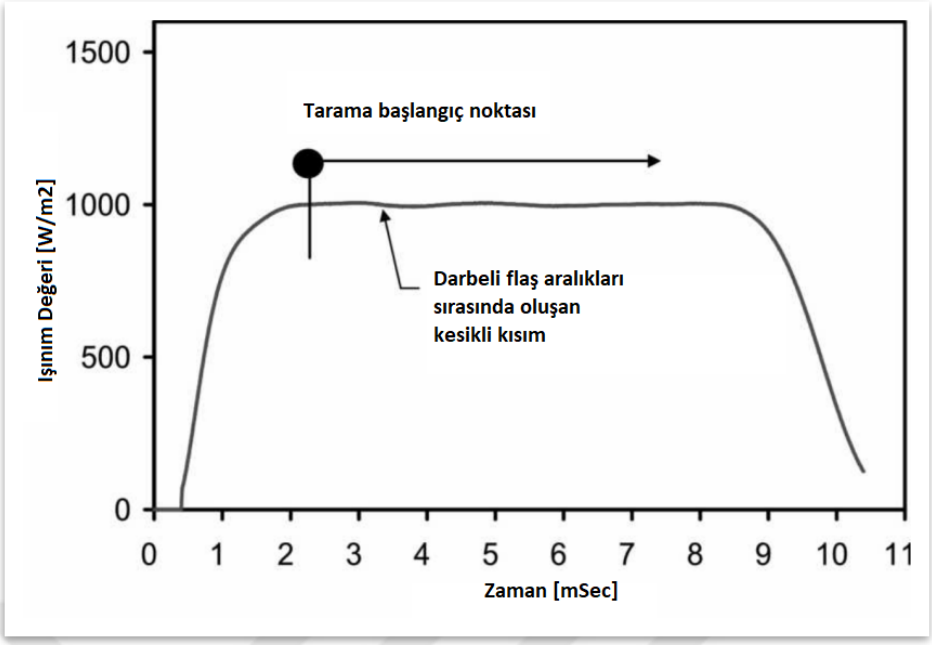
- M. Shimotomai ve arkadaşları güneş simülatörlerinin bir FV modülün I-V özelliklerini ölçmesi için, modülün kolay monte edilebilir olması, ölçüm doğruluğunun en iyi düzeyde iyileştirilmesi ve ölçüm süresinin azaltılmasını şiddetle istemektedir. Bu kapsamda güneş simülatör çeşitlerini ele almışlardır.

FV modülün I-V özelliklerinin ölçümü için kullanılan iki tür güneş simülatörü vardır. Biri sürekli durum güneş simülatörü(steady-state type solar simulatör) diğeri ise darbeli güneş simülatörüdür(pulse type solar simulatör). Genel olarak darbeli güneş simülatörü, sürekli durum güneş simülatörünün ürettiği ile karşılaştırıldığında daha az ısı üretir, lambanın her zaman açık olması gerekmediğinden, optik parçalar üzerinde daha az bozulmaya neden olmadığından elektrik gücünün tasarrufuna katkıda bulunur ve lambanın ömrü daha uzundur. Bu nedenlerden dolayı darbeli güneş simülatörü genellikle FV modülün üretim hattında kullanılır. Darbeli güneş simülatörü ile I-V ölçümü için birkaç yöntem vardır ve her çeşit FV modülünün özelliklerine uygun yöntemi kullanmak tercih edilir.

Çizelge 2.2. Ölçme yöntemine göre sınıflandırma(M. Shimotomai et al., 2006).

Tipi	**Güneş Simülatörü Darbe Sayısı**	**Darbe Genişliği**	**Data/ Darbe Sayısı**
A	**80-100**	**1***	**1 nokta**
B	**80-100**	**3-10**	**1 nokta**
C	**3 or 4**	**3-10**	**Yarım ya da bütün**
D	**1**	**5-10**	**Bütün**
E	**1**	**<100**	**Bütün**

A tipi çoğunlukla kullanılır. Tip B, yavaş optik ve elektriksel tepki karakteristiğine sahip FV modüller için uygundur. C tipi, ölçüm süresinin daha kısa olmasını sağlar. Tip D ve E genellikle tek ışık kaynağı ile ölçüm yöntemi olarak bilinir.



Şekil 2.6. Darbeli ışınım aralıklarının zamana bağlı ışınım şiddeti grafiği(M. Shimotomai et al., 2006).

Tüm sonuçlar ele alındığında yukarıdaki sonuçların özetlenmesi ile, bir FV modüldeki I-V ölçümünde, FV modülün tepki özelliklerine uygun ışınım darbe genişliğinin kullanılması (tarama süresi) gerektiği ortaya koyulmuştur. Çoklu kristal silisyum ve tek kristal silisyum FV modüllerde 5 ms tarama süresinde, 3 darbeli ve 4 darbeli güneş simülatörü ölçümünün daha etkili olduğu bulunmuştur. Daha yavaş tepki veren FV modüllerde, her bir darbe aralığı için bir veri noktası olan B tipi ölçümünün etkili olduğu kabul edilmiştir. Yavaş cevap veren FV modüllerde ise P_{mpp} cevabı yavaş olan, türü ve I_{sc} cevabı yavaş olan türü bulunmuştur. Tekrarlanan ölçümlerde önce FV modülün karakteristiğinin ışıma ile değiştiği ölçümlerde değişen karakterlerin sonucunda ölçüm tekrarlanması en önemli detaydır (M. Shimotomai et al., 2006).

- Bu yazıda D. Polverini ve R. Galleano, ESTI'de (Avrupa Güneş Test Kurulumu) darbeli bir güneş simülatörünün spektrumunun ölçümleri için hızlı spektroradiometrenin kullanımı konusunda bir kalibrasyon prosedürü ve iyi laboratuar uygulaması sunmuştur. Spektroradiometre kalibrasyonu ve spektrum ölçüm belirsizliklerinin değerlendirmesi, FV modül performansının hesaplanmasındaki etkileri ile birlikte sunulmaktadır. Güneş simülatörü spektrumlarını ölçmek için spektroradiometre kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk kısmı, kalibre edilmiş standart bir lamba vasıtasıyla cihazın kalibrasyonunda oluşmuştur. Spektroradiometre daha sonra 1,5 ms ışıtım süresi ile A sınıfı bir simülatörün spektrum ölçümleri için kullanılmıştır (IEC60904-9 standardına göre). Bu duyarlılık analizi sırasında değişken spektroradiometre gecikme süresi (ışınımın başlangıcından beri), entegrasyon süresi ve açısal eğim ayarları yapılmıştır. Özellikle belli dalga boyu bölgesine (800-1.100 nm) odaklanarak hızlı spektroradiometrenin davranışı da araştırılmıştır. Son olarak, güneş simülatörünün ölçülen spektral ışınım dağılımı, IEC60904-7'ye göre spektral uyumsuzluk düzeltme faktörü hesaplamaları için kullanılmıştır. Bu hesaplamalar için kullanılan I-V eğrileri, STC'deki (standart test koşulları: 1.000 W / m^2, AM 1,5 ve 25 °C) çoklu kristal silisyum ve ince film CIGS (bakır indiyum galyum diselenide) FV modüller üzerinde kapalı olarak ölçülmüştür. Spektroradiometre kalibrasyonu, lamba kaynağına doğru olmayan oryantasyondan ne kadar etkilenebileceğini gösterir: bu nedenle, tekrarlanabilir açılı bir eğim için cihaz için özel bir mekanik kurulum gerektirmektedir. Darbeli güneş simülatöründeki spektrum ölçümleri iyi bir tekrarlanabilirlik göstermektedir. Ayrıca, STC'deki FV modüller için I-V eğrileri üzerindeki veri analizi yaparken darbeli simülatörün spektrumunun modül elektrik parametrelerinin hesaplanmasını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Tüm bu sonuçlara dayanarak, hızlı spektroradiometreler kullanılarak periyodik spektrum kontrolü uygulanmalı ve darbeli güneş simülatörleri için kalibrasyon tekrarlılığı önerilmiştir (D. Polverini et al., 2012).

- Büyük FV laboratuvarının ortak yayınladığı bu makaleye göre; Dünyada FV uygulamalarının miktarı arttıkça, bu tür teknolojilerin enerji arz talebi konusundaki güvenilirliği hem enerji üretimi hem de onu destekleyen finansal yatırımlar için giderek daha önemli hale gelmektedir. FV üretim kalitesini mümkün olan en yüksek seviyede tutmak ve hatta iyileştirmek için referans laboratuvarların güvenilir ve doğru ölçümleri esastır. Bu amaca ulaşmak için, uluslararası referans laboratuvarları arasında FV modül kalibrasyonu ile ilgili periyodik karşılaştırmaların sürdürülmesi için birincil öneme sahiptir;

1) Mümkün olan en yüksek ölçüm güvenliği derecesi sağlanır;

2) Sonunda standart koşulların ötesinde ek ölçüm koşulları ve parametreleri içeren geleneksel FV teknolojileri için bir “kalibrasyon ölçümü” yapılır;

3) İnce film FV teknolojilerinin kalibrasyon uygulamaları karşılaştırılabilir ve geliştirilebilir;

4) FV pazarındaki en son gelişmelere ve bunların yönetimine cevap vermek için, taslak hazırlama ve güncelleme konusunda dünya çapında fikir birliği oluşturulabilir ve genişletilebilir.

Bu çerçevede, FV modül kalibrasyonu için dört referans laboratuvarı arasında ikinci bir karşılaştırma, daha önce yapılan kalibrasyon kampanyası ile D. Dirnberger ve ark., Şubat 2015 ile Şubat 2017 arasında yapmışlardır.

Makalede sunulan ilgili dört laboratuvar şunlardır :

-Avrupa Güneş Araştırma Komisyonu Merkezi'nin (ESTI), (Ispra, İtalya)

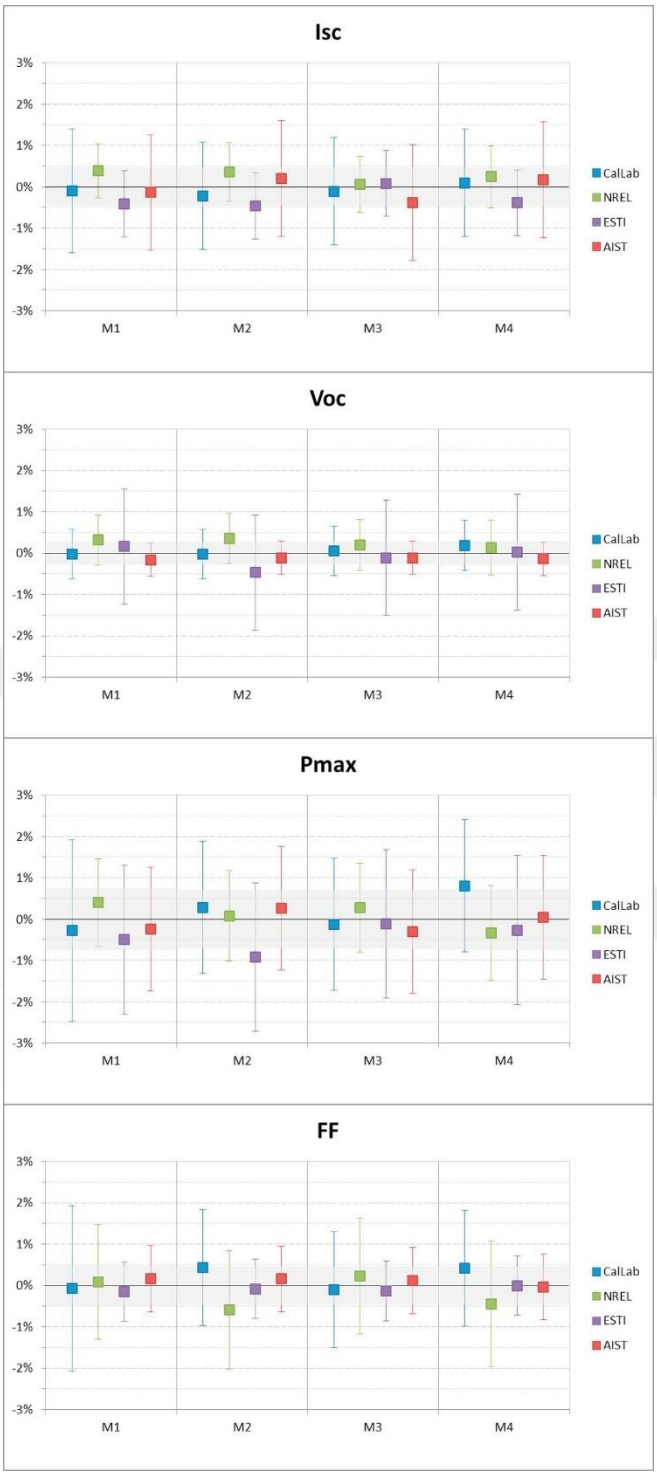
-Fraunhofer ISE Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü (CalLab, Almanya)

-Ulusal İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST) (Tsukuba, Japonya)

-Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) (Golden, CO, ABD)

Çizelge 2.3. Çalışmada ele alınan FV modül teknolojileri. (E.Salisa et al., 2017)

Modül	**Teknoloji**	**Hücre Sayısı/Tipi**	**Ölçüler [m × m]**	I_{SC} **[A]**	V_{OC} **[V]**	P_{mpp} **[W]**	*FF* **[%]**
M1	Yüksek Verimli c-Si	240/Honeycomb	1.610 × 0.860	7.355	43.30	239.8	75.30
M2	Tek c-Si	72/6 in.	1.970 × 0.990	8.286	44.29	272.9	74.34
M3	Yüksek Verimli c-Si	96/5.1 in.	1.559 × 1.045	6.2	64.7	318	79.3
M4	Çoklu c-Si	60/6 in.	1.650 × 0.990	8.37	37.2	240	77.6
M5	CI(G)S	170/stripes	1.256 × 0.976	2.2	112	170	67.0
M6	CI(G)S	104/stripes	1.586 × 0.670	3.11	58.5	120	66.0
M7	CdTe	154/stripes	1.200 × 0.600	1.99	60.5	87.5	72.7



Şekil 2.7. C-Si FV modüller için ölçüm belirisizliği sonuçların özeti. (E.Salisa et al., 2017)

Her laboratuvar için, ağırlıklı ortalamadan sapma yüzdesi, gösterilen sonuç için belirtilen genişletilmiş birleşik belirsizlik katsayısını (UC) temsil eden hata çubukları ile gösterilir ve sıfırın çevresindeki gölgeli alan, her bir ölçücü için ağırlıklı ortalama genişletilmiş birleşik UC'yi temsil eder.

Kısa Devre Akımı, I_{sc}

Şekil.2.8 deki sonuçlara göre tüm c-Si modüllerinin I_{SC}'sindeki ağırlıklı ortalamadan sapmalar, −% 0,5 ve +% 0,4 arasındadır; bu aynı zamanda M1 ve M2 modüllerinin sonuçlarından kaynaklanan sapma aralığıdır. Sadece ölçülen değerlerin referans değerden −% 0,4 ile % 0,2 arasında değiştiği yüksek verimli modülleri göz önüne alındığında biraz daha küçük bir belirsizlik yayılması bulunur.

Açık devre gerilimi, Voc

V_{OC} değerleri referans değerden −% 0,5 ve +% 0,4 arasındadır; genel karşılaştırmaya göre, bir önceki ölçümlere kıyasla genel anlaşmadaki bir iyileşme gözlenmiştir, bireysel ölçümler ağırlıklı ortalamalardan ±% 0,6 arasında farklılık göstermiştir (Dirnberger ve ark., 2014). Bu, I-V eğrisi ölçümleri sırasındaki sıcaklığın genel olarak daha iyi bir şekilde kontrol edilmesiyle açıklanabilir çünkü bu ölçüm ile ilgili belirsizlikler temel olarak değişmez ve hatta önceki karşılaştırmaya göre azalır.

Maksimum güç, P_{mpp}

Referans değerden ölçülen değerlerin sapmaları -% 0,9 ile % 0,8 arasındadır, ESTI M2 ölçümü için alt limiti, CalLab M4 ölçümünde üst limit değerini rapor eder. Karşılaştırmadan sonra M4'ün CalLab ile yeniden ölçümü, ilk ölçüme kıyasla P_{mpp}'ta - % 0,31 değerinde değişim göstermiştir. Bu güç kaybı, M4 modülünün karşılaştırılmasından önce ve sonra elektrolüminesans testi ile görüntüleme ile CalLab'da gerçekleştirilen ölçümlerde dokuz ilave hücre mikro çatlağıyle ilişkilendirilmiştir. Modül M4 için gözlenen hasarın ölçüm sonuçlarındaki yayılmaya katkıda bulunduğuna inanılmaktadır.

Geleneksel c-Si modülleri için en geniş yayılımın rapor edildiğini görmek ilginçtir. Yüksek verimli olanlar ise ± % 0,5 aralığında ağırlıklı ortalama ile ölçüm hassasiyetine sahiptirler. Tüm sonuçlara rağmen, c-Si modüllerin en büyük sapma aralığı Dirnberger ve ark., 2014'de yapmış olduğu önceki karşılaştırma değerine kıyasla (± % 1,3) önemli bir gelişme ile sonuçlanmıştır.

Özellikle c-si farklı durumları ayrıntılı olarak analiz edersek, c-Si için bildirilen tüm ölçümler ± % 0,6 belirsizlik sayılarına karşılık gelir. Ek olarak, bu ölçümler, birkaç istisna dışında, önceki karşılaştırmalara kıyasla (Dirnberger ve

diğerleri, 2014) değerlendirildiğinde tüm laboratuvarlar tarafından genel olarak azaltılmış bir belirsizlik sabitine (UC) sahiptir. Bu nedenle, c-Si FV kalibrasyonunun hem geleneksel hem de yüksek verimli modüller için çok iyi bir güven seviyesine ulaştığı ve birkaç yıl öncesine kıyasla genel olarak belirsizliğin azaldığı kanıtlanmıştır. Bu aynı zamanda son kullanıcıların FV modül teknolojisine yaptığı yatırımlar için daha iyi bir finansal risk değerlendirmesine çevrilebilir.

Doluluk Çarpanı (FF Faktör)

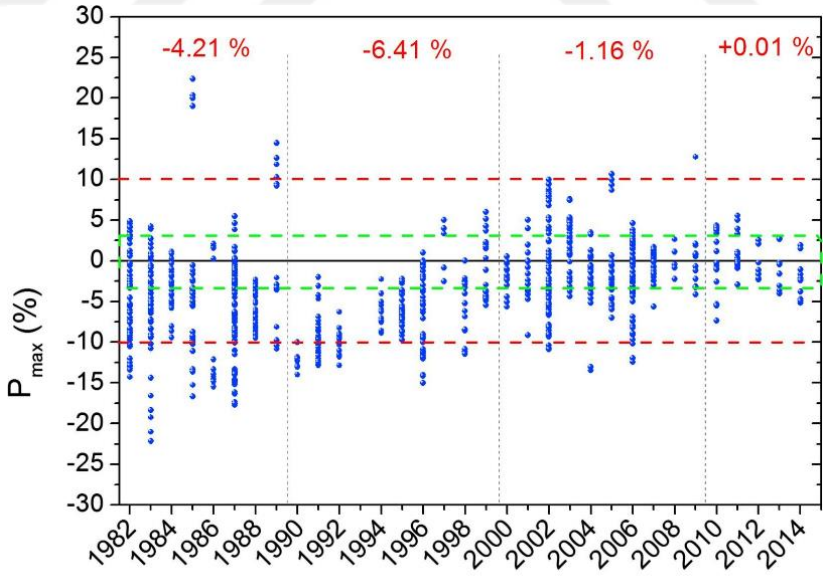
FF'ün ağırlıklı ortalama etrafındaki değişimi −% 6,6 ve +% 0,4 arasındadır. Yine, yüksek verimli modüller için ağırlıklı ortalamalar geleneksel c-Si olanlara göre daha küçük bir yayılıma sahiptir. Yüzde sapmalar yüksek verimli FV modüller için ± %0,2 'dir (E.Salisa et al., 2017).

- M.B. Campanelli ve arkadaşları bir FV modülün etkin ışınım şiddetine bağlı olarak STC koşulları altındaki kısa devre akımının, kısa devre akımı oranına dayanan entegre bir ölçüm ve modellemesini ele almışlardır. Standart bir spektruma göre etkin ışınımı ölçmek için bir FV referans hücresi kullanan bu yaklaşım, IEC 61853-1 gibi performans ölçümlerinde önemli faktörler olan FV modül ve referans hücreye özgü sıcaklık ve spektral ışınım etkilerini ele alır. Diyot tabanlı eşdeğer devre performans modellerinde olduğu gibi, bu ölçümlerde kalibre edilmiştir. Spektral bağımlı kısa devre akım sıcaklık katsayılarının kullanılmasından kaçınan bu yaklaşım, çok sayıda FV kalibrasyon laboratuvarı tarafından kullanılan standart spektral düzeltme parametresinin doğrudan bir uzantısı olan sıcaklığa bağlı bir spektral düzeltme fonksiyonunu kullanır. Eşleşen bir referans hücre kullanıldığında, bu fonksiyon değeri aynı, yani bir olur ve hesaplanması gerekmez. Bu yaklaşım, FV performans testinin ilerlemesinde ve ışınımı izlemek için referans hücrelerde kullanan modellemenin geliştirilmesinde faydalı olmayı hedeflemektedir (M.B. Campanelli, 2015).

- Ölçüm belirsizliği, farklı teknolojilerin en yüksek enerjiyi ürettiğini doğru bir şekilde ayırt etmeyi zorlaştırıyor. Ek olarak, bu belirsizlikler, bozulma oranı, spektral kayıplar ve diğer performans kaybı faktörleri gibi düşük dereceli performans etkilerini maskeleyecek kadar büyüktür. Güç derecesi belirsizliğinin olmaması durumunda, bu etkiler enerji verimliliği karşılaştırmalarında ve belirli bir

yerde en iyi performans gösteren teknolojinin seçiminde önemli olabilir. Bu nedenle, FV modüllerin güç toleransında düşük belirsizliklere yüksek ihtiyaç vardır (G. Makrides et al., 2012).

- J. Lopez ve arkadaşı yapmış oldukları bu çalışmada, ölçülen FV modül parametrelerinin (P_{mpp}, I_{sc}, V_{oc}) yıllar içinde evrimini, Ispra İtalya'daki Avrupa Güneş Test Kurulumu'nda (ESTI) gerçekleştirmiştir. Üreticilerin FV modül etiket üzerindeki toleransı yıllar içinde değişmiş, çoğu üreticiler 80 ve 90'larda ±%10 olacağını söylemiştir. Son yıllarda beyan edilen tolerans ise ±%5'e, ardından ±%3'e düşürülmüştür ve bugün −0 /+ %3 değerleri oldukça yaygındır. Operasyonel bir sistem kurulumunda FV modüllerin beyan edilen güç toleransını bilmek, orijinal modül gücünün üretimden itibaren 10 yıl içinde ne kadar değişeceğinin bilinmediği veya eksik olabileceği durumlarda ya da FV sistemlerin yaşlanmasının araştırtırıldığı durumlarda ek bilgi olarak faydalı olacağından bahsetmişlerdir. Bu çalışma, 1982'den 2014'e kadar çeşitli zaman dilimlerinden üretilen farklı teknolojide 992 adet kristal silisyum bazlı FV modüllerden seçilmiş bazı sonuçları sunmaktadır.



Şekil 2.8. Yıllar içerisinde ölçülen P_{mpp} ile etiket değerindeki P_{mpp} arasındaki farkı. (J.Lopez et al., 2018).

P_{mpp}, I_{sc} ve V_{oc} farklarını ve 1982'den 2014'e kadar araştırılmış olan tüm süre boyunca 992 kristal silisyum FV modülün değerleri göstermektedir. Ölçülen değerlerden ortalama olarak bir P_{mpp} farkı ve −% 3,35 tüm süre boyunca etiketli ve ± % 5,7 standart sapma elde edilmiştir. Günümüzde pek çok FV modül üreticisi pozitif sapmalara karşı % 0 toleranslara sahipken, eski modüller genellikle eşit olarak simetrik pozitif / negatif sapmalara sahiptir.

Çizelge 2.4. Son 20 yılda FV modül çıktı gücü arasındaki farktan maliyetin tahmini ve toplam maliyete ilişkin örnekler (J.Lopez et al., 2018).

Yıl	**FV Modül Fiyatları (USD_{2016}/W_p)**	**P_{mpp} etiket (W)**	**P_{mpp} ölçüm (W)**	**Modül Sayısı**	**P_{mpp} Farkı (%)**	**Tahmini Maliyet (USD_{2016})**	**Gerçek Maliyet (USD_{2016})**	**Kazanç (USD_{2016})**
1987	7.41	49.7	46.7	60	−6.1	22,098	20,764	**1334**
1992	6.71	95	84.5	32	−11.1	20,390	18,136	**2254**
1996	5.90	75	66.2	40	−11.8	17,698	15,622	**2077**
2000	4.88	85	81	35	−4.7	14,526	13,839	**687**
2005	4.43	200	180	15	−6.0	13,301	12,503	**798**
2006	4.73	180	162.5	17	−9.7	14,474	13,067	**1407**

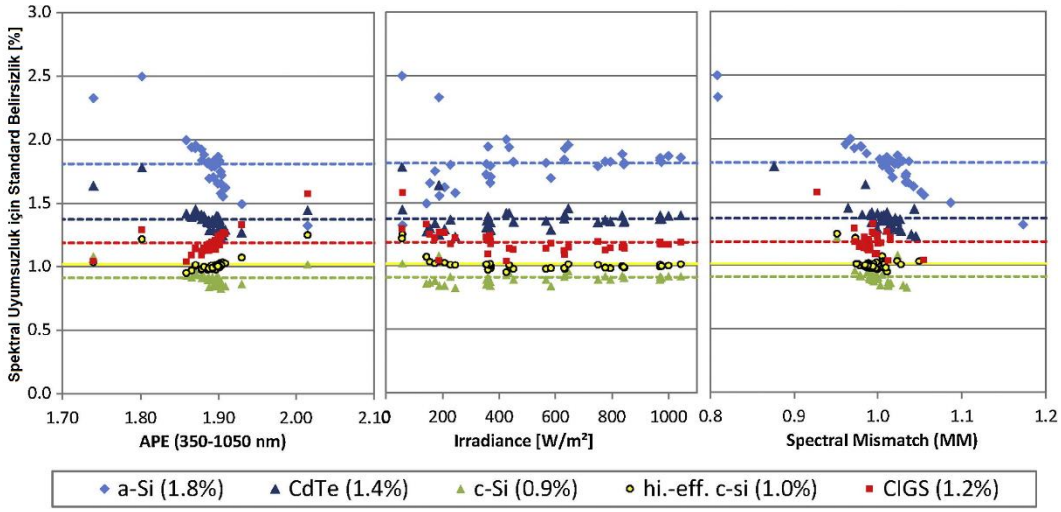
Ölçülen elektriksel parametrelerin (I_{sc}, V_{oc} ve P_{mpp}) nominal değerleri ve 992 kristal silisyum FV modüllerinin etiket değerlerinden 32 yıllık bir süre için sapması analiz edilmiştir. Ölçülen ve etiketlenen güç arasındaki fark, 1990'ların ortalarından itibaren önemli bir değişiklikle on yıllar içinde azalmıştır. P_{mpp} ve I_{sc}, bu dönemdeki en büyük değişiklikleri göstermiştir. Bu arada V_{oc}, etiketinde ortalama değerlerde çok farklı bir gelişme gözlemlenmemiştir. 1980'lerde −%4,21'den 2010'larda +%0,01'e dek, on yıl boyunca ortalama değerlerle ortalama % −3,15 arasında bir ortalama fark elde edilmiştir. Son on yılda tolerans aralıklarını karşılamayan FV modüllerin sayısı yıllar içinde azalmıştır.

Ayrıca yıllar içinde üretim yapan fabrikaların güneş simülatörünü üretim bandı sonuna eklemeleriyle öngörülen Pmpp değerlerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. İlk yatırım maliyeti (ABD doları), 1990'ların ortalarına kadar FV modül fiyatındaki düşüşten etkilenir ancak 1990'ların ortasına kadar maliyetlerde

düşüş gözlemlenir, 3 kWp'lik sistemler için başlangıçtaki ortalama ilk yatırım maliyeti 3000 ila 5000 USD arasındadır. 2000'lerden itibaren, fazla ödenen maliyet 400 USD'nin altına ve bazı durumlarda negatif değerlere (fayda) düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak etiket değeri ve ölçülen modül değeri arasınaki farkın maliyete olan etkisi araştırılmıştır (J.Lopez et al., 2018).

- Değişken spektral ışınım, bant boşluklarına ve spektral tepkilerine bağlı olarak FV modüllerin ölçüm performansını etkiler. Bu nedenle, enerji derecelendirme veya verim tahmin prosedürleri, belirli bir FV teknolojisi için etkili bir şekilde mevcut olan ışınımı dikkate alarak hesaplanmalıdır. Freiburg'da yapılan bu araştırmaya göre spektral uyumsuzluk belirsizliği ilk önce girdi verilerinin belirsizliğine, yani ölçülen spektral dağılıma, test edilen modülün spektral tepkisine ve ışıma ölçümü için kullanılan referans hücreye bağlıdır; ve bir ikincisi, ölçülen ve referans spektral dağılım arasındaki ve sırasıyla test edilen FV modülün ve referans hücrenin spektral tepkisi arasındaki kesin sapmalara bağlıdır.

Herhangi bir hesaplama yapılmadan önce, yukarıda belirtilenlerden şu sonuçlar çıkarılabilir: Birincisi, burada kullanılan referans hücre tüm dalga boyları için birleşik bir spektral tepkiye sahip olduğu için, eşleşen referans hücrelerinin kullanımına kıyasla daha büyük belirsizlikler beklenebilir. İkincisi, MM'in (Spektral Uyumsuzluk) belirsizliği spektrumların ve spektral tepkilerin şekline bağlı olduğundan, her FV modül teknolojisi ve farklı spektral dağılımlar için ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Yukarıda ışınım için tartışıldığı gibi, her bir spektral uyumsuzluk değeri de kendine özgü belirsizliğe sahiptir.



Şekil 2.9. Hesaplanan uyumsuzluk değerine karşı APE (Ortalama Foton Enerjisi), geniş bant ışınımı ve değerin kendisinde göreceli belirsizlik (D.Dirnberger et al., 2015).

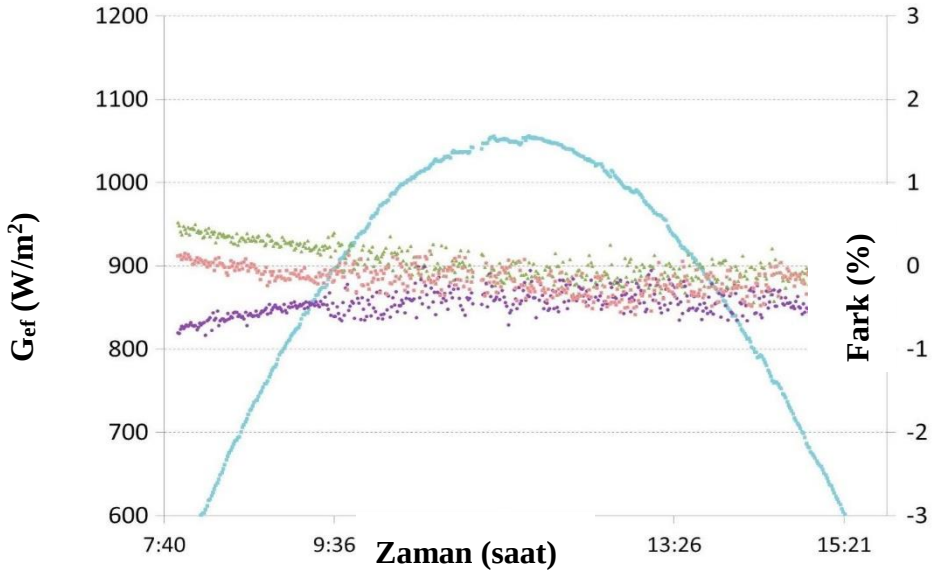
Yatay çizgiler FV modül teknolojisi başına hesaplanan ortalamayı gösterir. Belirsizlik üzerindeki en önemli etki, spektral cevabın şekli ve ardından spektral dağılımın şeklidir.

Sonuç olarak, spektral etkinin belirsizliğinin araştırılmakta olan FV modül teknolojisine bağlı olduğu ve spektral etkinin kendisi ile aynı büyüklükte olduğu gerçeği, belirsizliği analiz etmek ve belirsizliği en aza indirmek için daha fazla çaba gerektiğini vurgulamaktadır. Bilim insanlarının, gelecekteki ilişkili bir belirsizlik değerlendirmesiyle, spektral etki konusundaki sonuçlarını sunmaları çok önemlidir, çünkü bu sonuçların anlamlı şekilde karşılaştırılmasını ve farklı metodolojilerin değerlendirilmesini sağlar. Bu nedenle belirsizlik analizi, enerji derecelendirme veya verim tahmin prosedürleri içindeki spektral etkinin dikkate alınması yönünde önemli bir adım sunar (D.Dirnberger et al., 2015).

- J. Manuel ve arkadaşları yapmış oldukları bu çalışmada 10 adet farklı c-Si FV modülün dış mekan ölçümlerini yaparak I-V karakterizasyonunu belirlemeyi hedefleyerek İspanya Güneş Enerjisi Enstitüsü ve Madrid Teknik Üniversitesi iş birliğinde bu araştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Madrid'de yapılan bu deney açık gökyüzü koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Standart test koşullarını sağlayan bir iklimlendirme soğutma sistemine sahip basit, ısı yalıtımlı ahşap kutu "Solar Box" olarak adlandırılmış ve bu kutu sayesinde FV modüllerin

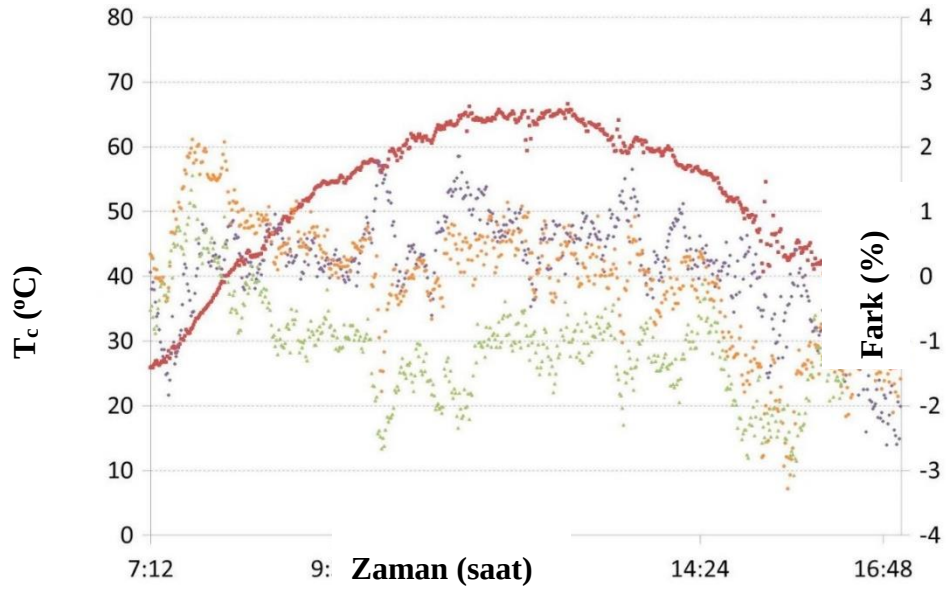
karakterizasyonlarını ve sıcaklık katsayılarını, Standart Test Koşullarında doğrulanarak ölçme imkanı sağlamışlardır. Aynı zamanda I-V eğri taraması ile FF (Doluluk Çarpanı) bozulmalarını önlemek için kapasitörünün en az 20 ms'lik şarj sürelerini sağlamak üzere ayarlanan, bu deney düzeneği sayesinde bir kapasitif yük vasıtasıyla kesintisiz sonuç elde etmişlerdir.

Işınım değerini ölçmek için kullanılan referans güneş hücrenin kalibrasyonuna verilen öneme dikkat ederek deney süresi tamamlanmıştır. Bu "Solar Box" sayesinde referans hücre ölçümleri ölçüm standartlarına izlenebilir kılınmış ve ölçüm belirsizliğine karar vermede büyük katkı sağlanmıştır. 5. Uluslararası Spektro ve Geniş Bantlı Radyometre Karşılaştırmasında belirtilen farklı bağımsız kalibrasyonları geçerek, kalibrasyon değerini % 1,34 ile genişletilmiş bir belirsizlikle (k = 2) belirlemişlerdir. Dört noktalı Kelvin ısı ölçerler ile sıcaklık ve I-V ölçümleri gibi standart elektriksel ölçümler yapılırken, elde edilen sonuçlara göre STC'ye ve I-V karakterizasyon parametrelerinde aşağıdaki genişletilmiş belirsizliklere (k = 2) yol açmıştır: P_{mpp} için % 1,87, I_{sc} ,için % 1,72, Voc için % 0,80 ve FF için % 0,90'dır. Ayrıca, referans modüllerini ışınım ve sıcaklık sensörleri olarak kalibre etmek için "Solar Box" kullanılmıştır. Karşılık gelen belirsizliği doğrudan ışınımın görülme açısı ile ilişkilendirmek mümkündür. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi ortaya çıkan genişlemiş belirsizlikler (k = 2), Referans Işınım (Gef) altındaki açılar 50° için % 1,93 ve sıcaklık katsayısı için % 0,38'dir.



Şekil 2.10. Etkin ışınım, 10 FV modülün ortalaması ile elde edilen Gef. (J. Manuel et al., 2017).

Bu ortalama ile her bir modül arasındaki 600 W/m^2 üzerindeki ışınımlar arasındaki farklar (sunumun netliği için farklılıklar sadece üç modül için gösterilmiştir). Ölçümler 19 Mayıs 2016 tarihinde kaydedilmiştir.



Şekil 2.11. 10 adet FV modülün ortalaması ile elde edilen modül sıcaklığı ve bu ortalama ile her modül arasındaki farklar(J. Manuel et al., 2017).

Sunumun açık olması için, sadece üç modül için farklılıklar gösterilmiştir. Ölçümler 2 Haziran 2016 tarihinde kaydedilmiştir.

Bu deneyde ciddi maliyet ve mekan kaygısı içeren pahalı güneş simülatörlerine gerek kalmadan yüksek kaliteli FV ölçümlerine kapı açmaya yardımcı olabileceğini açıklamaya çalışmıştır. Halihazırda FV tesislerini elektrik şebekelerine dahil eden, ancak halen FV uzman kalibrasyon laboratuvarlarından yoksun ve sık sık açık gökyüzü koşullarından yararlanan ülkelerde yerel ölçümler için ilgi çekici bir konuyu ele almışlardır.

José Manuel ve Francisco arkadaşları ile yürütmüş olduğu bu çalışmada güneş enerji santralleri için kalite güvence süreçlerini açık hava ölçümleri için genel çerçevesinde gelişererek ele almışlardır (J. Manuel et al., 2017).

2.1. Ölçüm Standartları

IEC; Merkezi Cenova İsviçre'de bulunan, uluslararası komitelerinin üyesi olduğu, 1906 yılında kurulmuş elektriksel, elektronik ile ilgili teknolojiler konusunda uluslararası standartları hazırlayan ve yayımlayan organizasyondur. IEC'in çalışmaları; terminoloji ve simgeler, elektromanyetik uyum, ölçüm ve performans, tasarım gelişimi, güvenlik, çevre ve benzeri ilgili genel konuların yanısıra elektronik, manyetik ve elektromanyetik, multi medya, telekomünikasyon, enerji üretimi ve dağıtımı konularını da kapsamaktadır.

FV Modül Kalibrasyon Ölçümlerinin tekrarlanabilirliği, dünyanın önde gelen güvenilir laboratuvarlarıyla karşılaştırılarak ve ancak ve ancak tüm ölçüm prosedürlerine eksiksiz bağlı kalarak gerçekleşir. Etiket ve veri sayfalarına dayalı şartnamelerdeki güveni arttırmasından dolayı, olabildiğince düşük ölçüm belirsizliği modül üreticisi ve yatırımcılar için avantajdır. Bu anlamda bu tez çalışması sırasında belirsizliğin inceleneceği güç ölçümlerinde kullanılan tüm IEC standartları aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Söz konusu standartlar gerek ölçümlerin içinde gerekse laboratuvar özelliklerinde değinilmiştir.

2.1.1. IEC 61853 Standardı

IEC Teknik Komitesi IEC 61853`ü en son elde edilen belirisizlik bulguları ile daha da geliştirmeye çalışıyorlar. Ancak "Fotovoltaik Modüllerin Güç Ölçümü Belirsizliklerinin Analizi" başlıklı yüksek lisans tezinde başlıca en önemli standard olarak ele alınmıştır. Aşağıdaki kısımları içeren dört ayrı başlık altında incelemek mümkündür;

IEC 61853-1:2011

“Fotovoltaik modül performansı deneyi ve enerji derecelendirmesi” İlk bölümde “Işınlama, sıcaklık performans ölçümleri ve güç derecelendirmesi” olarak inelemek mümkündr, farklı ışınım şiddeti ve sıcaklık aralıklarında, Watt cinsinden güç derecelendirmesinin yapıldığı fotovoltaik modüllerin performansını değerlendirmek için gereklilikleri açıklar.

IEC 61853-2:2016

“Spektral duyarlılık, geliş açısı ve FV modül çalışma sıcaklığı ölçümleri” Bu bölümde ışınıma etki eden tüm spektrum parametrelerini ölçmek adına geliştirilmiş geliş açısı, modül çalışma sıcaklığı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve çeşitli açılar gibi etki parametre değerlerini açıklayan prosedürdür.

IEC 61853-3

“Fotovoltaik modüllerin enerji derecelendirmesi”, bir fotovoltaik modülün enerjisini 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.

2.1.2. IEC 60904 Standardı

IEC 60904 kapsamlı olarak bir FV modülün karakteristik özelliklerinin belirlendiği I-V eğrisinin ölçülmesine dair tüm detayları içeren prosedürdür. Bu tez çalışması sırasında önemli standartlar arasındadır. Çünkü ancak IEC 60904 standardına uygun ölçülen modülün karakterizasyon analizi yapılabilir.

IEC 60904-1:2006

"FV modülün ölçülen I-V özelliklerine sıcaklık ve ışınım düzeltmeleri için prosedürler", doğal veya simüle edilmiş güneş ışığı altında modülün akım gerilim özelliklerinin ölçülmesine ilişkin prosedürleri açıklar. Ölçüm için temel gereklilikleri belirtir, kullanılan farklı ölçüm teknikleri için prosedürleri tanımlar. En önemlisi de ölçüm belirsizliğini en aza indirgemek için gerekli uygulamaları gösterir.

IEC 60904-1-1:2017

"Çok katlı FV modüllerin I-V ölçümü, doğal veya simüle edilmiş güneş ışığı altında akım gerilim 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 FV modüller için düşünülmüştür, ancak konsantre çok katlı fotovoltaik modüller için de uygulanabilir niteliktedir. IEC 60904-8-1 prosedüründe çok katlı FV modüllerin spektral tepkisi ile ilgili prosedürleri bulabilirsiniz.

IEC 60904-2:2015

"FV referans hücrelerin sınıflandırılması", seçimi, ambalajlanması, işaretlenmesi, kalibrasyonu ve bakımına ilişkin şartları belirtir. Bu standart doğal ve güneş simülatörü ışığı altında fotovoltaik hücrelerin, modüllerin ve dizilerin elektriksel performansını belirlemek için kullanılan FV referans hücrelerin gerekliliklerini kapsar.

IEC 60904-3:2016

"Referans spektral ışıma oranı verileri ile FV modüller için dış ortam ölçüm prensipleri", FV modüllerin elektriksel çıktısını belirlemek için temel ölçüm

prensiplerini tanımlar. Bu standartta verilen ilkeler, FV modül 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 spektral ışınım dağılımı bu standartta verilmektedir. Bu standartta yer alan ilkeler, hem doğal hem de güneş simülaöründe yapılan testleri kapsar.

IEC 60904-4:2009

"Referans hücre için kalibrasyon izlenebilirliği oluşturma prosedürleri", Uluslar Arası Ölçü Birimlerine göre de geçerli olan IEC 60904-2 prosedürü gereğince fotovoltaik referans hücre prosedüründen bahsetmiştik. Bu standard ise FV hücre performansını ölçmek amacıyla doğal veya güneş simülatöründen çıkan ışık ışınımını ölçmek için kullanılan referans FV hücrelerin kalibrasyon prosedürleri için geçerlidir. Dolayısıyla IEC 60904-1 ve IEC 60904-3 prosedürlerinin uygulanmasında gerekli olan fotovoltaik referans hücreyi temsil eden prosedürdür.

IEC 60904-5:2011

"FV hücre ve modüllerin eşdeğer hücre sıcaklığının açık devre gerilim yöntemiyle belirlenmesi", bir fotovoltaik hücre, modül veya bir dizi modülün 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 FV modülleri için prosedürler", referans modüllerin seçimi, ambalajlanması, kalibrasyonu, markalanması ve bakımı için şartlar getirir. Bu, IEC 60904-2'yi tamamlamayı amaçlamaktadır.

IEC 60904-7:2008

"FV modüllerin ölçümleri için spektral uyuşmazlık faktörünün hesaplanması", bir fotovoltaik modülün ölçümü sırasında girilen ölçme aygıtının ışıma değerinde görülen sapma 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 katlı FV modüller için geçerli olan bu prosedürü çok katlı FV modüller için de kullanmak mümkündür. Son revize halinde bu test yönteminin ne zaman gerekli olup olmadığına dair revizeler mevcuttur.

IEC 60904-8-1:2017

"Çok katlı FV modüllerin spektrum tepkisi ölçüm prosedürü", çok katlı FV modüllerin spektrum tepisini ölçmek için gerekli prosedürleri içerir.

IEC 60904-9:2007

"Güneş simülatörü performans prosedürü", FV modüllerin laboratuvar ortamı güç ölçümlerinde kullanılan güneş simülatörlerinin sınıflandırma prosedürünü açıklar. Specktral ışınımın homojen bir şekilde dağılımının, test düzlemindeki ışınım farklılığı ve zamanlayıcının ışınım düzensizliği güneş simülatörün A, B ya da C sınıfı için belli kriterleri oluşturur. Gerekli ölçüm yöntemlerinin oluşturulması adına gerekli prosedürler her sınıf güneş 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.

2.1.3. IEC 60891 Standardı

"FV modüllerin I-V karakteristiklerinde ölçülen sıcaklık ve ışık şiddeti düzeltmeleri için geliştirilmiş prosedür", kullanılan tüm prosedürler için de referans faktörler belirleyen tüm standartları da kapsar. FV modüllerin I-V ölçümü için gerekenler IEC 60904-1 bu anlamda ortaya koyulmuştur. Kristal silisyum FV modüllerin ölçülen I-V özelliklerine göre sıcaklık ve ışıma düzeltmeleri için prosedürleri tanımlar. Ayrıca, bu düzeltmelerle ilgili faktörleri belirlemek için kullanılan prosedürleri de tanımlar. FV modüllerin I-V ölçümü için gereklilikler IEC 60904-1'de belirtilmiştir.

Bu tez çalışması sırasında yapılan tüm deney ve düzenlemeler belirtilen IEC standartları kapsamında sunulmuştur.

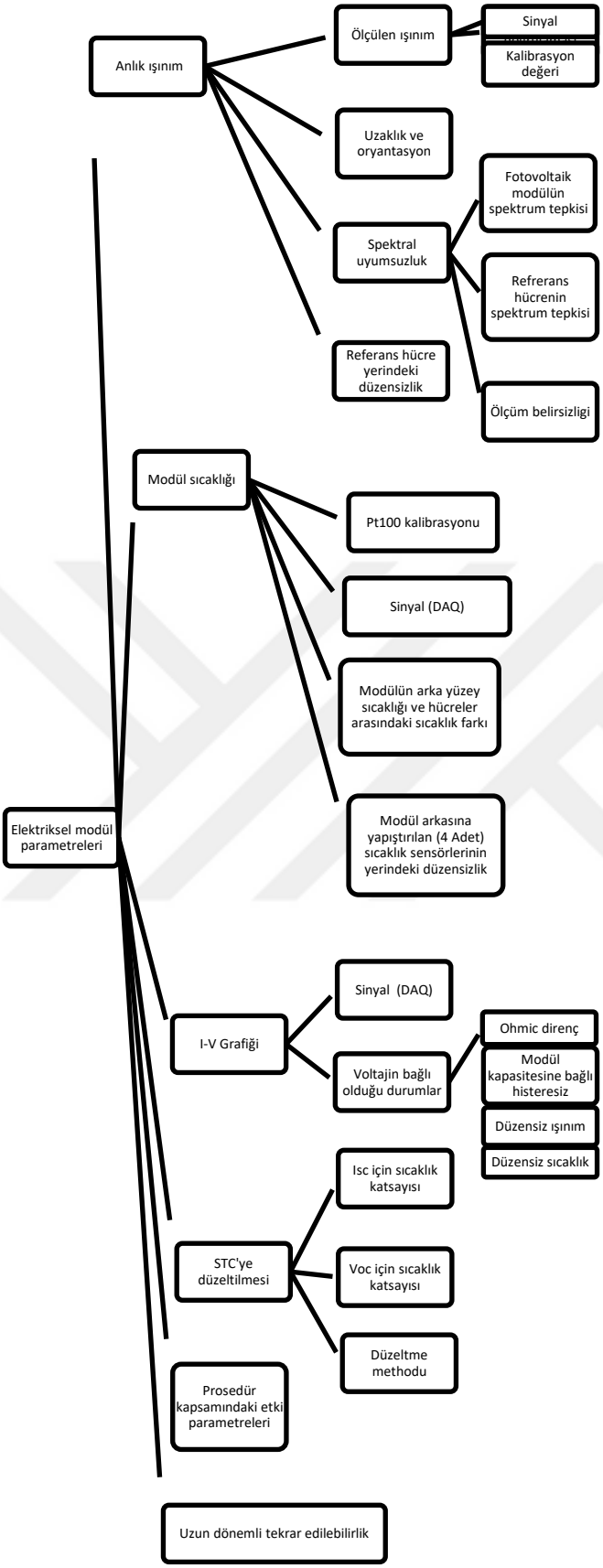
3. ÖLÇÜM YÖNTEM ve GEREÇLERİ

3.1. I-V Karakterizasyon Sistemi

I-V karakterizasyon sistemi FV hücre ve modüllerin güç ölçümü testlerinde hassas ölçümler yapmak için tasarlanmıştır. I-V karakterisyon sistemi bir güneş simülatörü içerisinde ve gün ışığına en yakın kalitede istenilen ışınım şiddeti aralıklarında gerçekleşen ölçümlerde güç çıkışı, verimlilik hesabı, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, direnç katsayısı, sıcaklık katsayısı, maksimum güç noktasındaki modül gücü değerlerini sayısal ve grafiksel verilerle iletebilmektedir. Her bir değişken değer için IEC standartlarına uygun şekilde doğrulama hesaplanır.

Belirsizliğe etki eden elektriksel modül parametrelerini tüm detayları ile ele aldığımızda Şekil 3.1'de başlıklar altında toplamak mümkün olacaktır. Şekil 3.1. ölçüm ve değerlendirme süreci ile ilgili olarak belirsizliğe neden olan etki parametlerini özetler ve neden/nasıl ortaya çıktığının yayılımını ana hatları ile göstermektedir. Ölçüm sürecindeki tüm bu belirsizlikler I-V eğrisinden belirlenen parametrelerin yanı sıra ışınım şiddetinin ve sıcaklığın modül üzerindeki etki parametresinin belirsizliklerinden kaynaklanmaktadır.

Ölçüm değerlendirme sürecinde belirsizliği vurgulayan iki ana aşama şu şekilde oluşur: Birincisi, etkin ışınım ve ölçülen sıcaklık ile belirlenen I-V eğrisi Standart Test Koşullarına düzeltilmelidir. İkincisi de düzeltilmiş I-V eğrisinden elektriksel modül parametreleri türetilmiştir. Tüm bu süreçlerde mutlaka ortamın sıcaklığı, nem ve ışınım değerleri göz önünde bulundurularak IEC şartlarında düzenlemeler yapılmıştır.



Şekil 3.1. STC'de güç ölçümlerinde belirsizlik kaynakları (D. Dirnberger ve U. Kräling, 2013).

Tüm bu birleşik belirsizlikler bir 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.

$$Y=Y_0 + c_1 \delta_1 + c_2 \delta_2 + ...+ c_n \delta_n \quad \text{(Denklem 1)}$$

Y ölçülen değer, X_i girdi değerleridir.

$$Y_0 = f (X_{1,0}, X_{2,0} , ..., Xn,_0)$$

$X_{1,0}$, $X_{2,0}$ ve $Xn,_0$ nominal değerler,

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

Denklem 1'de belirtilen genel bir belirsizlik formülüdür. Birleşik belirsizlikler için ise GUM'da (*Ölçümlerde Belirsizliğin İfadesi İçin Rehber)* belirtilen bileşik belirsizlik yayılma yasasına göre belirlenmiş aşağıdaki denklem bir EXCEL programına entegre edilmiş sekliyle kullanılmaktadır.

$$U_c^2 (y) = (C_1U_{X1})^2 + (C_2U_{X2})^2 + ... +(C_nU_{Xn})^2 \quad \text{(Denklem 2)}$$

Denklem 2 sayesinde ölçülen ışınım, etkin 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 standartlaştılmış ölçüm belirsizliklerini de eklemeye imkan sağlar.

Tüm litaretür araştırmaları sonucu elde edilen bilgiye göre şu anda yaygın olarak görünen Standard Test Koşulları dışında yapılan güç ölçümlerinde belirsizliğe etki parametler şunlardır:

- Spektral uyumsuzluk hatası [%]
- Referans hücre ve Mmodül arasındaki ışınımın homojensizliği [%]
- Modül yüzeyi ve PN eklemi arasındaki sıcaklık farkı sapmaları [%]

- Modül ön ve arka yüzü arasındaki sıcaklık farkı [°C]
- Sıcaklığın ışınıma bağlı sapması [%]
- Histerisizin P_{mpp}`ye olan etkisi [%]

Bu tez çalışmasında yukarıda belirtilen parametrelerin güç ölçümlerine belirsizlik değerleri detaylı olarak ve ölçümler ile incelenmiştir. Farklı teknoloji modüller kullanarak karşılaştırmalı testlerde belirsizlik ve sapmalara önem verilmiştir.

3.2. Belirsizlik Tahmini

Bu çalışmada akretide bir FV modül kalibrasyon laboratuvarında yapılan belirsizlik hesaplaması GUM'da belirtilen kurallara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu klavuz gerekli standartların oluşturulduğu durumlarda üzerinde durulması gereken parametreleri belirtir. Kısacası, bir ölçüm sonucu belirsizliğini değerlendirmek ve ifade etmek için gerekli adımlar, GUM'ın 8. bölümünde şu şekilde özetlenmiştir:

(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 birleşik ölçüm belirsizliği denklemi ile hesaplanacaktır.

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

(7) Genişletilmiş belirsizlik verilmelidir.

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

Yapılan kalibrasyon ölçümleri bu adımları dikkate alarak incelenmiştir. Aşağıda belirtilen başlıklar altında toparlanarak detaylıca ele alınmıştır.

3.3. Etkin Işınımın Belirsizliğe Etkisi

3.3.1. Güneş simülatörü spektrumuna ait uyumsuzluk hataları

Bir güneş simülatörünün spektrum tepkisinden kaynaklanan hata belirsizlik hesaplamasında ne kadar pay aldığı, deney sonuçlarında gözlemlenmiştir. Ancak bir FV modülün güç ölçümünün belirlenmesindeki en önemli parametre ışınımdır, çünkü gerek güneş gerekse güneş simülatöründen elde ışınım sayesinde ancak FV modüllerin güç ölçümü gerçekleşmektedir. Güneşten ya da simülatörden gelen ışınım sırasında belirsizliğine etki eden en önemli parametre FV modülün spektruma verdiği cevabı yani tepki hatası sırasıyla aşağıdaki formüller ile hesaplanır:

$$SR(\lambda) = \frac{q * \lambda}{h * c} \text{ EQE}(\lambda) \text{ (A/W)} \quad \text{(Denklem 4)}$$

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

E(λ), gelen ışığın spektral ışınımını ifade eder. IEC 60904-3 standardına göre spektral uyumsuzluk faktörü, simülator spektrumu ile referans spektrum farkının, referans hücrenin spektrum tepkisi ve test altındaki modülün spektrum tepkisi farkına oranı ile ifade edilir.

$$MM = \frac{J_{sc}^{RC,ERef}\, J_{SC}^{TC,ESim}}{J_{sc}^{RC,ESim}\, J_{SC}^{TC,ERef}} =>$$

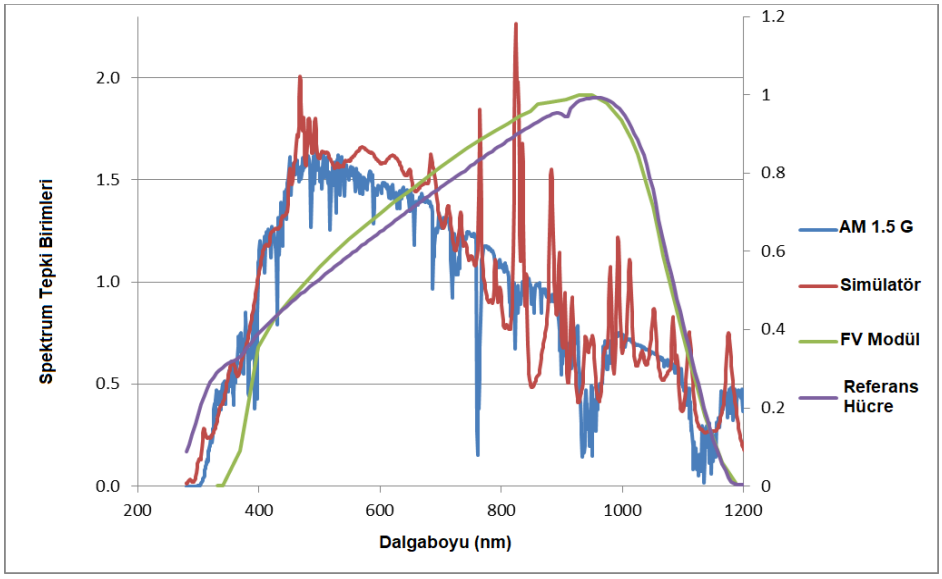
$$= \frac{\int SR_{RC}(\lambda)\, E_{Ref}(\lambda)d\lambda \int SR_{TC}(\lambda)\, E_{Sim}(\lambda)d\lambda}{\int SR_{RC}(\lambda)\, E_{Ref}(\lambda)d\lambda \int SR_{TC}(\lambda)\, E_{Ref}(\lambda)d\lambda} \quad \text{(Denklem 5)}$$

Bu formülde TC test hücresini, RC referans hücreyi, E*ref* referans spektrumun referans ışınımını ve E*sim* güneş simülatorü spektrumun spektral ışınımını gösterir.

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

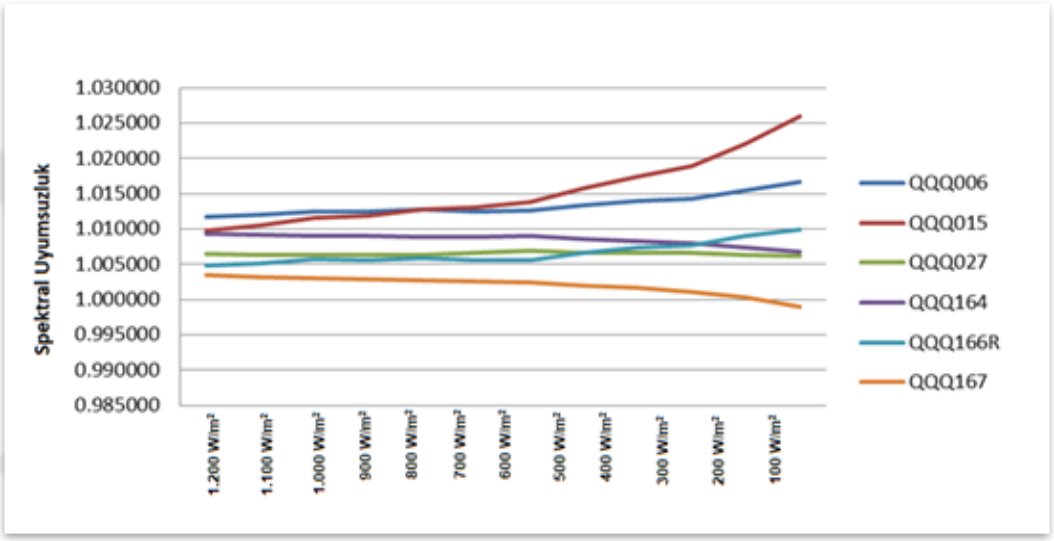
$$I_{sc} = \frac{\text{Kalibrasyon Değeri}}{\text{Referans Hücre Değeri}} * I_{sc\ REF} * (1/MM) \quad \text{(Denklem 6)}$$

$$I_{sc} = \int SR(\lambda) * E(\lambda)\, d\lambda \quad \text{(Denklem 7)}$$



Şekil 3.2. Bir test modül üzerinde alınan spektrum tepkisi grafiği.

Yukarıdaki şekilde AM 1,5 değeri için IEC 60904-3 standardına göre elde edilmiş bir ölçümde kullanılan çoklu kristal silisyum FV modülün ve referans hücrenin spektrum tepkisi verilmiştir. Kırmızı ile belirtilen simülatörün tepki değeri AM 1,5 global ışınıma ne kadar yakın olursa güneş simülatörünün o kadar iyi ölçüm yaptığını, yani gerçek güneş ışınım değerine yakın olduğunu ifade etmek mümkündür. Yine ölçülen FV modülün spektrum tepkisinin referans hücreye 1.000 W/m^2 'de yakın değerlerde çıkması ölçüm doğruluğunu ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Farklı ışınım noktaları için farklı test modülleri spektrumlarına ait uyumsuzluk hatası.

Akretide bir kalibrasyon laboratuvarında kullanmış olduğumuz test modülleri

- QQQ006 : Tek c-Si 220 Wp,
- QQQ015 : Çoklu c-Si 220 Wp,
- QQQ027 : Çoklu c-Si 280 Wp,
- QQQ164 : Referans Hücre,
- QQQ167 : Çoklu c-Si 255 Wp.

Bu FV modüller ile yapılan bu deneyde MM faktörü (Spektral Uyumsuzluk) 1,0 değerinde ölçüm başlangıcında değerlere eklenmiştir. Bunun nedeni, 1 değeri eklendiğinde belirsizliklerin pozitif yönde çıkmasıdır ve Spektral Uyumsuzluk hatası yaklaşık olarak % 2,6 değeri ile en fazla QQQ015 test modülünde

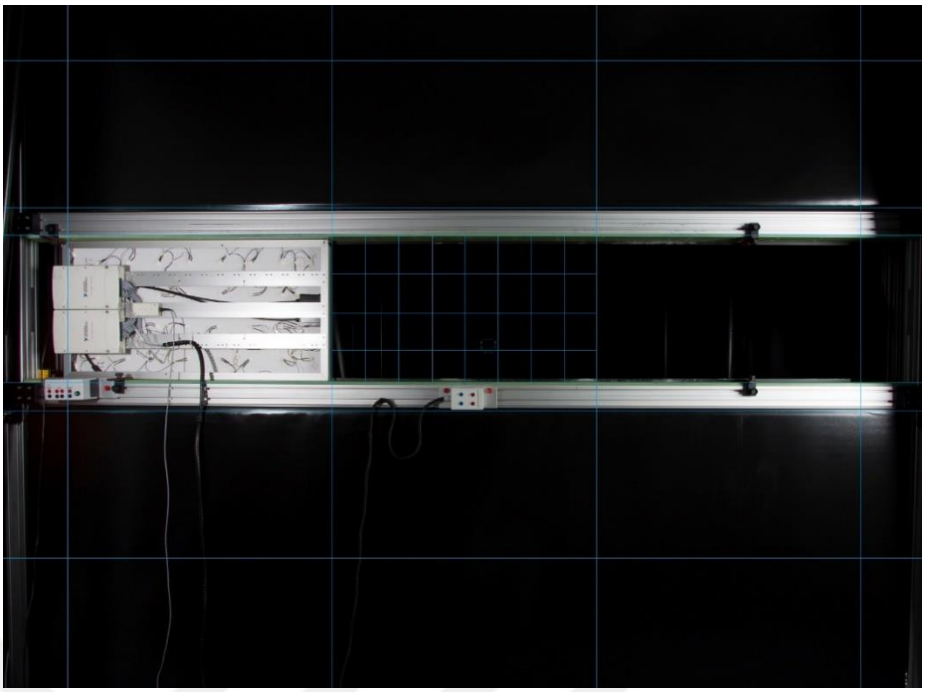
gözlemlenmiştir. Test modülleri arasında QQQ015 modülü olabilecek en kötü belirsizlik sonucunu ortaya koyar, bu yüzden en kötü durumlar için genişletilmiş belirsizlik dikkate alınmıştır.

3.3.2. Referans hücre ve FV modül arasındaki ışınımın homojensizliği

Referans hücre ve modül arasındaki ışınımın homojensizliği belirlenirken uygulanan test prosedürünce en önem verilmesi gereken durum referans hücrenin ortalama ışınım noktasına en yakın bir noktaya monte edilmiş olmasıdır. Bu test için özel geliştirilmiş laboratuvar modülün her bir hücresinde bağlantı kutusu monte edilmiş böylece ışınım ve sıcaklık değerleri her bir hücre için homojen şekilde gözlemlenebilir. Bu şekilde her hangi bir hücrenin üzerine gelen ışınım tek tek ölçülmüştür. Ayrıca bu test uygulanırken modül sırasıyla 1. pozisyonda x=0, y=0 düzleminden başlayıp aşağıda belirtildiği gibi başlayıp 6 farklı pozisyondaki düzleme yerleştirilerek sırasıyla ölçülmüştür. Ölçüm sırasında modül boyutlarının simülasyon programda muhakkak belirtilmesi ayrıca önemlidir.

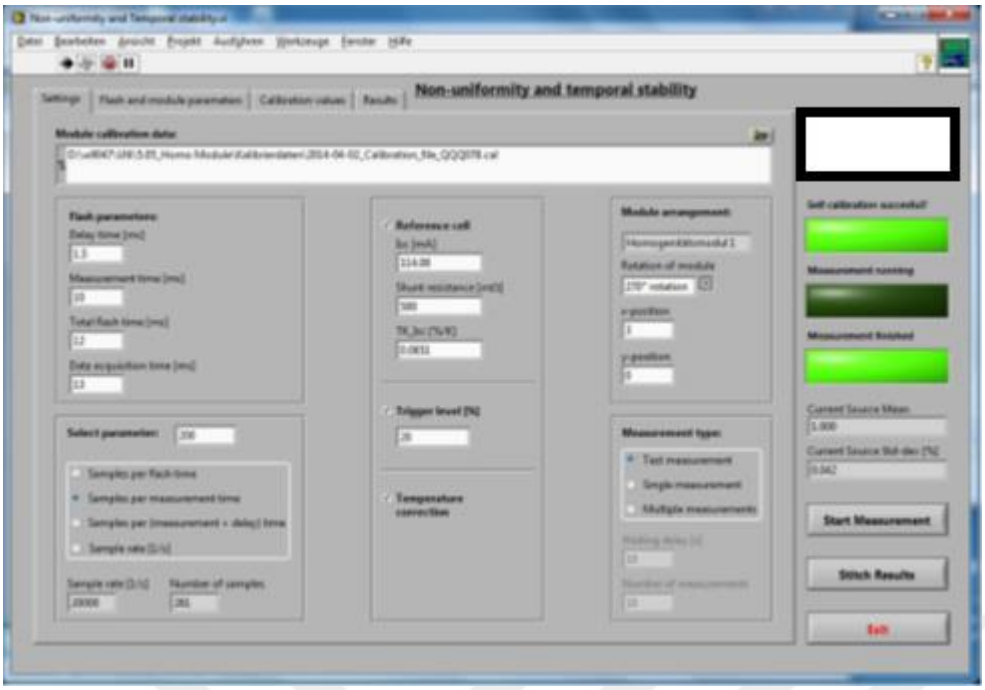
Çizelge 3.1. Homojenlik test modülü ve platform pozisyonları.

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

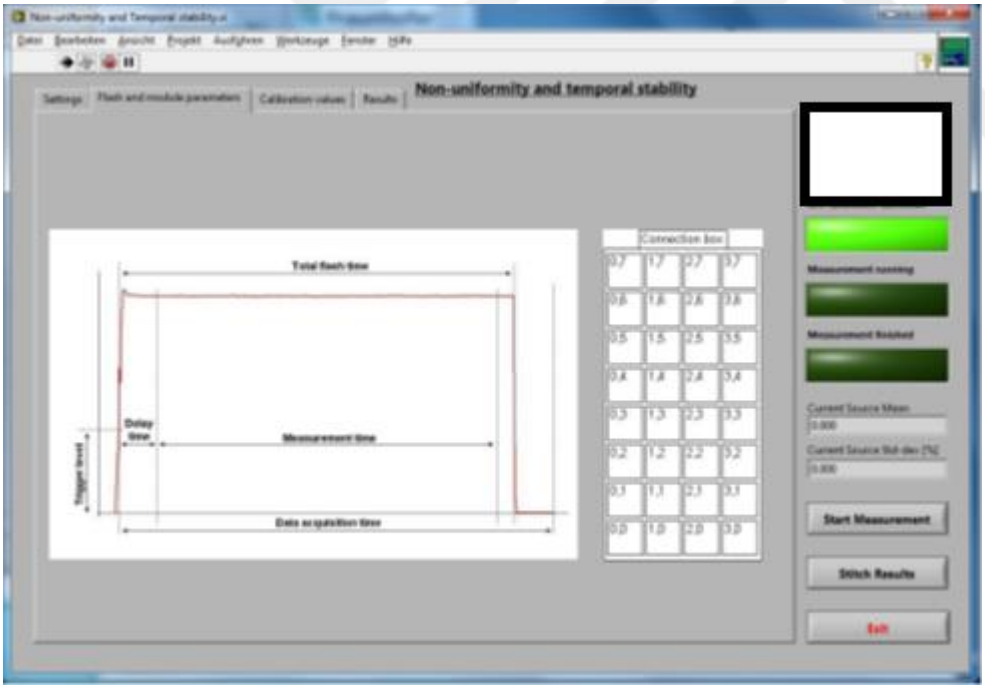


Şekil 3.4. Homojenlik test özel modülü ve platformu.

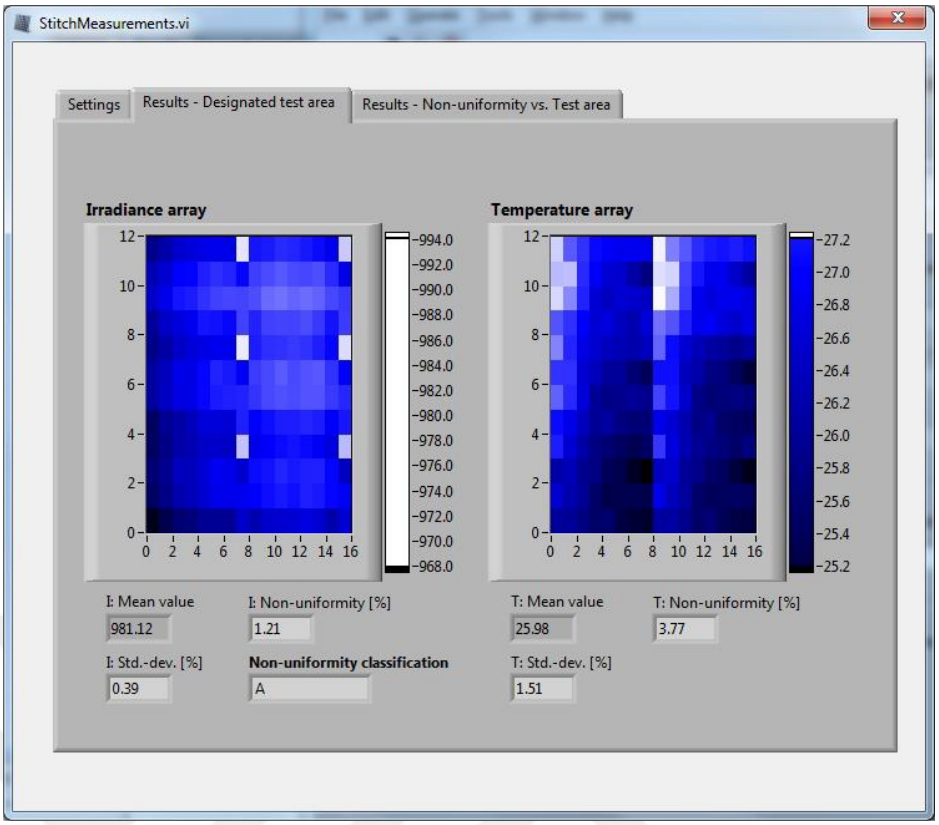
FV modül, Çizelge 3.1'de belirtilen pozisyonlara sırasıyla yerleştirildikten sonra sırasıyla önce 200 W/m², sonra 500 W/m² ve 1.000 W/m² için her biri üç tekrardan oluşmak üzere ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler sırasında referans hücre de pozisyonlara göre ortalanarak yerleştirilmiştir. Her bir ışınım için üç kez tekrarlanmasının nedeni en iyi sonuca ulaşabilmektir. Ölçüm sonuçları entegre bir programda simüle edilir. Programın ara yüzü Şekil 3.5'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.5. Program arayüzü.



Şekil 3.6. Pozisyonların seçilmesi.



Şekil 3.7. Ölçüm sonucu.

Her bir ışınım şiddeti değeri içim tek tek ölçülmüş olan 6 adet pozisyon değeri birbiri ile eşleştirilir. Ara yüz programından sonra bir EXCEL ölçüm tablosuna aktarılarak aşağıdaki gibi ışınım renk tablosu ortaya çıkar. Ardından çıkan renk tablosuna göre en yüksek ve en düşük ışınımın ortalaması alınarak belirsizlik değeri tespit edilmiştir.

1006,53	1004,56	1007,41	1005,01	1007,77	1009,77	1012,24	1010,34	1008,79	1002,49	1002,4
1005,91	1003,09	1004,27	1005,18	1009,31	1009,69	1012,41	1010,63	1007,93	1001,78	1001,68
1006,78	1005,32	1008,58	1007,19	1012,46	1012,79	1015,83	1010,43	1007,84	999,07	998,86
1006,75	1007	1008,59	1007,91	1011,72	1013,05	1014,95	1010,76	1006,12	999,04	999,03
1006,03	1006,39	1007,44	1007,15	1009,97	1012,3	1013,28	1014,33	1009,92	1000,75	1000,65
1007,78	1006,78	1008,83	1008,91	1011,77	1010,06	1011,11	1014,25	1010,5	1001,45	1001,24
1009,16	1008,57	1009,35	1009,48	1010,43	1009,19	1008,55	1013,46	1009,67	1002,75	1002,57
1008,96	1008,74	1009,94	1006,27	1007,79	1008,92	1008,86	1013,54	1012,31	1004,28	1003,55
1008,6	1005,51	1008,1	1005,24	1006,47	1006,81	1007,77	1010,76	1011,94	1006,47	1006,57
1006,9	1004,05	1006,82	1006,71	1008,88	1008,21	1008,56	1011,97	1011,96	1007,6	1007,84
1006,67	1001,85	1006,48	1007,98	1011,36	1009,87	1011,74	1013,68	1014,25	1007,78	1008,16
1003,69	1000,23	1005,36	1009,16	1012,2	1011,3	1012,77	1014,15	1013,28	1008,05	1008,55
1000,92	1000,39	1005,4	1007,79	1010,62	1011,33	1011,58	1012,83	1011,98	1007,52	1007,71
1001,78	999,96	1004,08	1006,24	1010,65	1010,59	1011,22	1011	1010,61	1007,81	1008,1
1001,96	1000,73	1001,26	1006,08	1011,5	1012,22	1011,4	1012,12	1009,69	1008,17	1008,25
996,84	997,02	1001,48	1005,04	1009,49	1010,08	1009,4	1012,33	1012,55	1006,74	1006,77

Şekil 3.8. 1.000 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri.

Şekil 3.8'de yapılan ölçümlere göre 1.000 W/m² ışınımda modül üzerine düşen ışınımın düzensizliği % 0,94 elde edilmiştir.

505,51	503,51	504,51	504,51	503,49	504,49	505,49	504,49	503,49	502,49	500,49
506,51	502,51	502,51	502,51	504,49	504,49	505,49	505,49	504,49	502,49	498,5
505,51	502,51	505,51	504,51	506,49	505,49	508,49	505,49	502,49	502,49	498,5
505,51	505,51	504,51	504,51	506,49	506,49	507,49	506,49	504,49	501,49	498,5
504,51	503,51	504,51	504,51	505,49	505,49	505,49	505,49	505,49	503,49	499,5
504,51	503,51	505,51	504,51	505,49	503,49	505,49	505,49	505,49	504,49	498,5
506,51	505,51	506,51	505,51	505,49	503,49	504,49	504,49	504,49	503,49	499,5
504,51	505,51	506,51	504,51	501,49	504,49	504,49	500,49	505,49	505,49	500,49
505,51	504,51	505,51	505,51	503,51	503,51	504,51	502,49	504,49	504,49	503,49
504,51	503,51	504,51	503,51	505,51	504,51	504,51	503,49	505,49	504,49	502,49
504,51	501,51	504,51	505,51	506,51	504,51	506,51	505,49	505,49	506,49	503,49
503,51	501,51	503,51	505,51	507,51	506,51	506,51	506,49	506,49	505,49	502,49
501,51	500,51	503,51	504,51	506,51	505,51	505,51	504,49	504,49	504,49	502,49
501,51	499,5	503,51	503,51	505,51	504,51	505,51	504,49	503,49	504,49	502,49
501,51	500,51	501,51	503,51	506,51	505,51	505,51	504,49	504,49	503,49	502,49
497,5	499,5	502,51	503,51	503,51	504,51	505,51	501,49	504,49	505,49	501,49

Şekil 3.9. 500 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri.

Şekil 3.9'da yapılan ölçümlere göre 500 W/m² ışınımda modül üzerine düşen ışınımın düzensizliği % 1,01'dir.

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	203.1	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	200.08
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	204.77	201.43	201.73	201.84	201.9	202.88	202.49	203.1
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	202.43	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 3.10. 200 W/m² ışınımda her bir hücrenin verdiği spektrum tepki değerleri.

Ölçüm sonuçları sırasında en yüksek belirsizlik değeri düşük ışınımda 200 W/m² için 1,36 değerinde belirlenmiştir. Böyle düşük ışınım değerinde FV modül ve referans hücre arasındaki güneş simülatörün etkisi ile oluşabilecek belirsizlik değerini tahmin etmek mümkün olacaktır.

3.4. Modül Akım-Gerilim Grafiği Etkisi

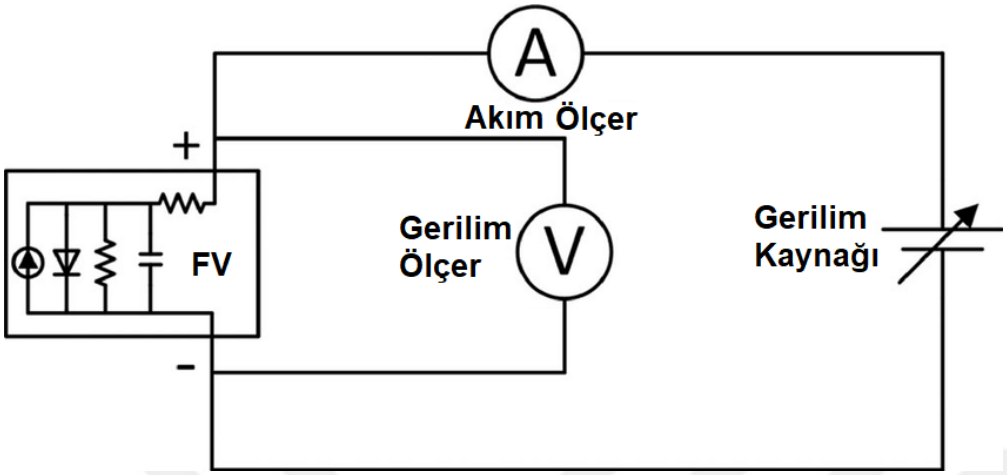
Güç ölçümleri sırasında elektronik yük, I-V eğrisini iki kadran üzerinden ileri ve geri yönde taradığı için negatif akım meydana gelmez. Güç ölçümlerinde gerilim

ve akım sırasıyla ± 250 V ve ± 20 A maksimum aralığında ölçülür. Kısa devre akımından (I_{sc}) açık devre gerilimına (Voc) ve açık devre geriliminden(Voc) kısa devre akımına (I_{sc}) doğru yapılan ileri ve geri kadran taraması ölçümlerinde histerisiz kayıpları sonuçları ortaya çıkar. Elektrik alandan kaynaklı olarak kapasitörü ya da bobini olan herhangi bir devre histerisiz kayıpları sergileyebilir. FV nodüllerde bulunan PN eklemi de bir kapasitör gibi davranmaktadır ve FV modüllerde güç ölçümü sırasında histerisiz kayıpları gözlemlenir. Özellikle kristal silisyum temelli fotovoltaik modüllerde, modülün iç kapasitansı nedeniyle akım-gerilim (I-V) ölçümlerinde güçlü bir histerisiz etki oluşur. Bu etki de, IV ölçüm sonuçlarında kayda değer hatalara sebep olabilir. İşte bu etki nedeniyle oluşan hatalar, "histerisiz kayıpları" olarak tanımlanabilir. Bu yüzden FV modül teknolojisine bağlı olarak histeresiz kayıplarını en aza indirgemek için çoklu kadran taraması ya da uzun süreli ışınlama yöntemi uygulanır, en iyisi uzun süreli ölçümler almaktır.

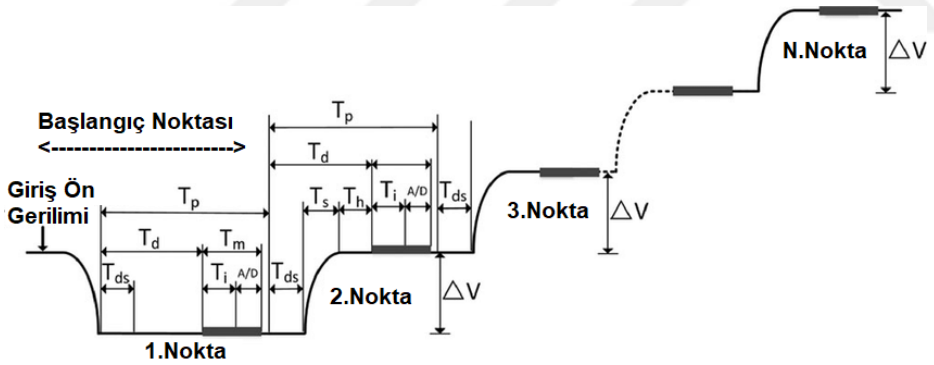
STC şartlarında güç ölçümlerinde Isc'den Voc'ye ileri yönde tek kadran taraması yapılır, bu durumda farklı teknoloji FV modüllerde histerisiz kayıplar kaynaklı belirsizliğine neden olur. Yüksek kapasiteli FV modüllerde doğru ölçüm sonucu için histeresizin 0.5 değerinin altında çıkması beklenir.

Günümüzde yüksek verimli kristal silisyum (c-Si) FV modül teknolojilerinin yanısıra farklı eklem katmanlı ince film (HIT) ile iç içe geçmiş arka temas ve pasifleştirilmiş serbest arka temasa sahip yüksek verimli modüller kullanılmaya başlamıştır. Bu FV modüller I–V ölçümleri sırasında kalibrasyonlarını ve performans testlerini zorlaştıran geniş bir dış kapasiteye sahip olma eğilimindedir. FV modüllerin I – V karakteristikleri ışınım altında test edilen FV modülün çıkış karakterlerindeki gerilimin taranması ve karşılık gelen akım değerinin ölçülmesiyle test edilir. Yüksek kapasiteli FV modüller için, modüle uygulanan değişken gerilime verilen yavaş tepki nedeniyle ölçülen I-V eğrisinde güçlü bir histerezis etkisi ortaya çıkar. Histerezis etkisi iki faktörden etkilenir: I – V tarama hızı ve tarama yönü. Hızlı bir tarama hızı ile, iç kapasitör şarj olduğu için, test akımı, ileri tarama yönünde (I_{sc}'den V_{oc}'ye) gerçek değerden düşük olabilir; ayrıca iç kapasitör boşaldığında test akımı ters tarama yönünde (V_{oc}'den I_{sc}'ye) daha yüksek olabilir.

İleri ve geri taramanın test sonuçları ile arasındaki fark genellikle histerezis hatalarını değerlendirmek için kullanılır.



Şekil 3.11. Gerilim kaynağı ölçere dayalı olarak yüksek kapasiteli bir FV modül için I – V ölçüm sisteminin şematik diyagramı



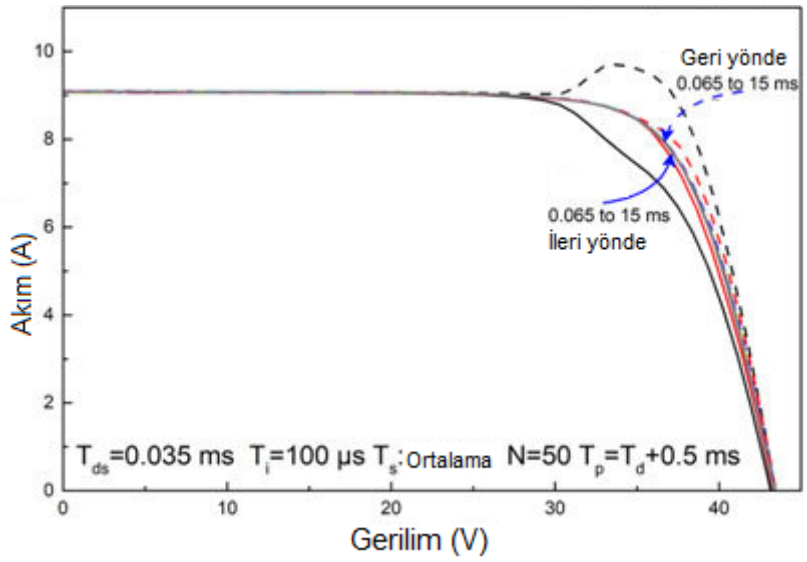
Şekil 3.12. Isc'den Voc'ye (ileri yönde) I –V eğrisi ölçüm işlemi parametrelerinin şeması. (Q.Gao et al, 2018).

Bir FV modüle ait I-V eğrisinin ileri yönde kısa devre akımından açık devre gerilimine doğru ölçüm işlemi gerçekleştirilirken orataya çıkan ilişkili sürelerin birbiriyle olan bağlantıları Şekil 3.12'de ki şemada gösterilmiştir. Giriş ön gerilimden sonra birbirini tekrar eden ölçüm noktaları içinde meydana gelen süre parametreleri histerisiz kayıplarının da belirlenmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Çizelge 3.2. Ölçüm süresi parametreleri

Sembol	**Parametre**	**Ölçüm Aralığı**	**Açıklama**
Tp	Periyot süresi	≥500 µs	I-V eğrisindeki bir noktanın toplam ölçüm süresi
Td	Ölçüm gecikme süresi	≥65 µs	Veri kaydı ve işlemeden önce bekleme süresi
Tds	Kaynak gecikme sürsi	≥35 µs	Giriş ön gerilimi değişmeden önce bekleme süresi
Ts	Kurulum süresi	-	Gerilim azaltma/arttırma zamanı
Th	Gerilim tutma süresi	-	Ölçümden önce, giriş ön gerilimden sonra tutma süresi
Ti	Biriktirme süresi	5 µs to 200 ms	Ortalama değerin hesaplanması ve data kaydedilmesi için geçen süre
A/D	Analog'dan dijitale dönüşme işlem süresi	-	Analog sinyalin dijital sinyale dönüşme süresi
Tm	Ölçüm zamanı	Ti + A/D	Veri kaydı ve işleme süresi
N	I-V eğrisinde taranan noktalar	≤1000	I-V eğrisi üzerinde ölçülen noktaların sayısı

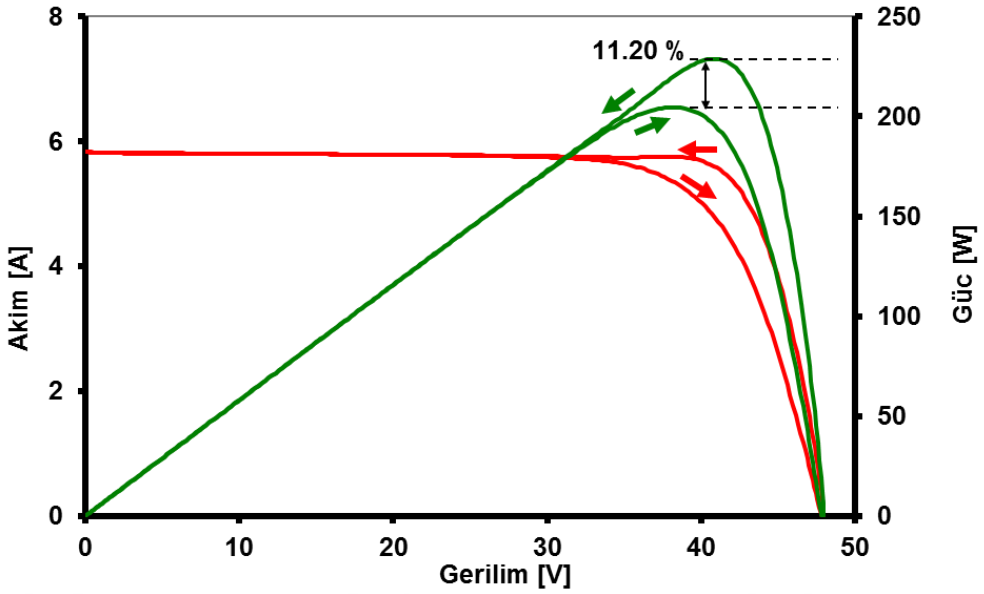
Şekil 3.12'de belirtilen I-V grafiği ölçümü sırasında oluşan tüm ölçüm parametrelerinin listesi çizelge 3.2.'de detaylı olarak sunulmuştur. Bu çizelgedeki en önemli detay tüm parametrelerin birbiriyle olan ilişkisidir. Dolayısıyla bir histerisiz kaybı meydana gelirken birden çok birleşik parametrenin neden olduğunu söylemek mümkündür. Tm (toplam ölçüm süresi), Ti ve A/D' nin işlem süresinin toplamına eşittir. A/D işlemi ise Ti ile ilişkilidir, bu durumda Ti de Tm ile ilişkilendirilebilir. Tp , Td , Tds , Ts ,Ti, ve N ölçüm sırasında direkt olarak yazılım üzerinden ayarlanır. Bu durumda I-V tarama eğrisi yüksek esneklik ve değişkenlik ile kontrol edildiği görülmüştür.



Şekil 3.13 Ölçüm gecikme süresi değiştirilerek alınan ölçümler sonucu histerisiz kayıpları sonucu (Q.Gao et al, 2018).

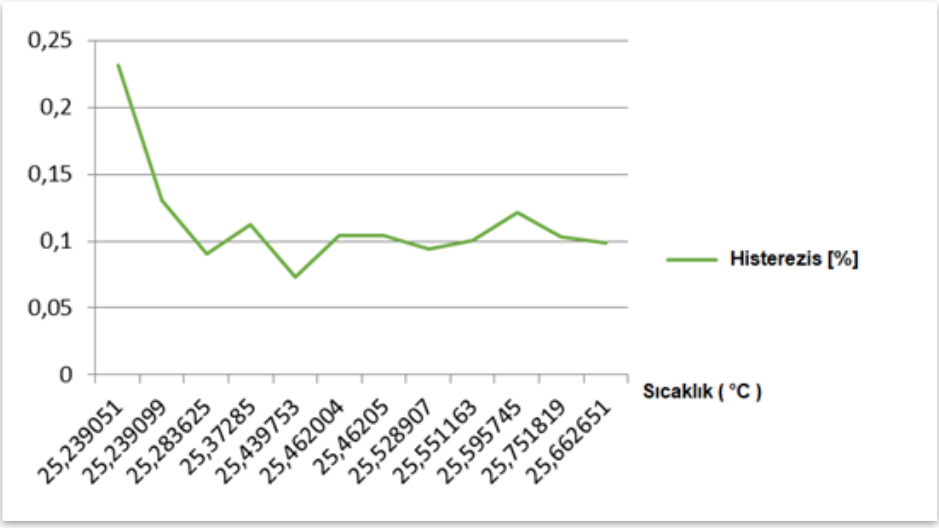
Histerezisin belirsizliğe olan etkisi büyük ölçüde yetersiz zaman sürecinden kaynaklanmaktadır. I–V grafiyle ölçülen FV modül çıkış gerilim değişiklikleri; stabilizasyon sırasında Td süresi olarak periyotlara bölünür. Histerezisin belirsizliğe olan etkisinin azaltılmasında Td'de zaman parametrelerinin ayarlanması önemlidir. Td (gecikme süresi); Tds, Ts ve Th'yi içerir. (Td = Th + Tds + Ts), Th parametresi yazılım içinde ayarlanması mümkün değildir. Tds ve Ts sabitlendiğinde, Td'yi niteliksel olarak Th temsil etmektedir.

Td'ye (ölçüm süresi) bağlı histerezis etkisi kontrol deneyleri, bir Td aralığı içinde 0,065 ila 15 ms aralığında gerçekleşmektedir.Tp değeri Td'ye 0.5 ms eklenerek ayarlanır ve diğer zaman parametreleri, Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Td, ileri ve geri yönde ölçülen I – V eğrilerini gösterir. Td 1ms 'den büyükse ölçülen I–V eğrileri arasındaki fark da Td arttıkça farklı yönlere doğru yavaş yavaş azalır ve 0,065 ile 1 ms arasında I – V eğrileri neredeyse çakışmaktadır. Bu nedenle histerisiz kayıpları eğrisinin azalması ve ortadan kalkmasında Th kritik parametredir.

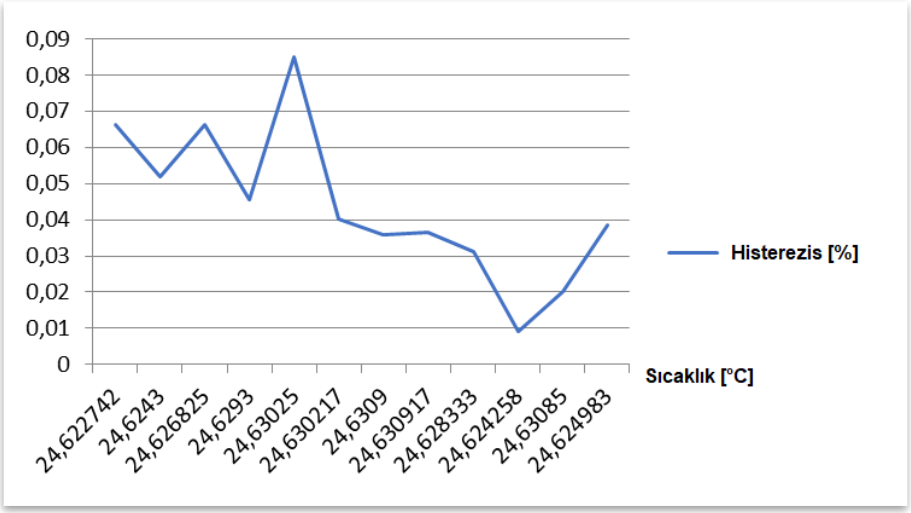


Şekil 3.14. X Marka FV modül için örnek histerisiz kayıpları gösteren akım-gerilim ve güç ölçüm grafiği.

$$Hyst\ [\varepsilon] = \frac{P_{mpp1} - P_{mpp2}}{P_{mpp1} + P_{mpp2}} * \%100 \quad \text{(Denklem 8)}$$



Şekil 3.15. HALM güneş simülatöründe sıcaklığa bağlı histerisiz kayıpları



Şekil 3.16. HALM güneş simülatöründe sıcaklığa bağlı histerisiz kayıpları

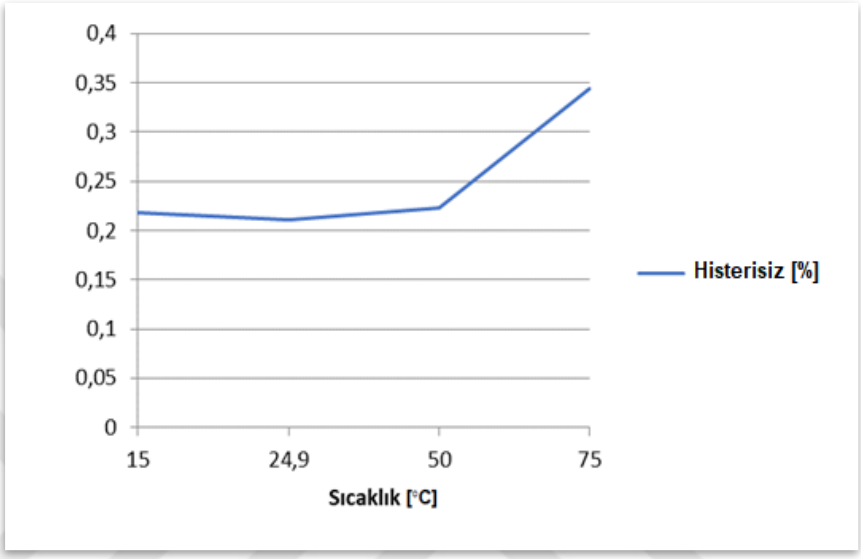
Şekil 3.12 ve 3.13'de gözlemlediği gibi HALM simülatörüde histerezis hatalı ölçümler sıcaklığa bağlı olarak fazla değişkenlik gösterdiği için yüksek kapasiteli FV modülllerin HALM simülatöründe ölçüm yapılması önerilmez.

Ölçümde güneş simülatörü şu şekilde çalışır. 15 °C'den başlar 75 °C'ye kadar her bir °C için sırasıyla ölçümler alınır. Örneğin 15,1 °C, 16,1°C, 17,1°C .... 73°C, 74°C, 75 °C gibi yani ölçüm alanında her bir derecede FV modül için sıcaklık kararlılığı sağlanır ve modül üzerine ışınım gelir. Bundan dolayıdır ki güç ölçümü testleri yalnızca tek yönlüdür, aksi halde ölçüm prosedürü gereği her bir FV modül için günleri alır.

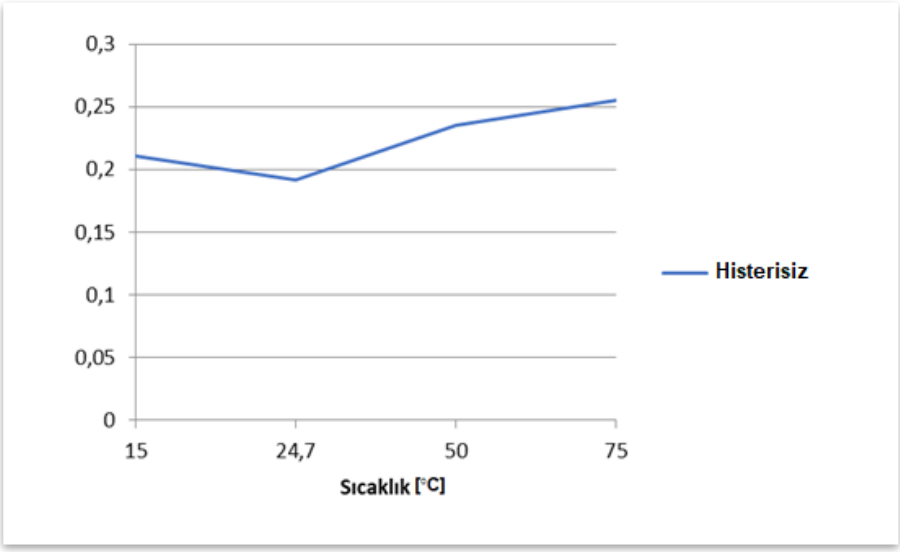
Standard test koşullarında ise test edilen her bir modül için alınan I-V grafiği sırasında üç ayrı histerezis ölçümü yapılmıştır. Denklem 8'e göre histerezisin % 0,5'den daha az olması için kesitli ölçümler yapılmıştır (Minimum 2 kesitten maksimum 18 kesite kadar, ileri ve geri kadran taraması yapılan ölçümlerdir).

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

Akım Gerilim grafiği oluşurken gerilimin tarama hızına ilişkin kapasite verimi kesit ölçümler ve histerezis 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 ± % 0,5 değerinden farklı olmaması gerektiği gerçeğini de garantiye alır.



Şekil 3.17. 295 Wp tek c-si FV modül için 1.000 W/m^2 'de sıcaklığa bağlı histerezis hatası değişimi.

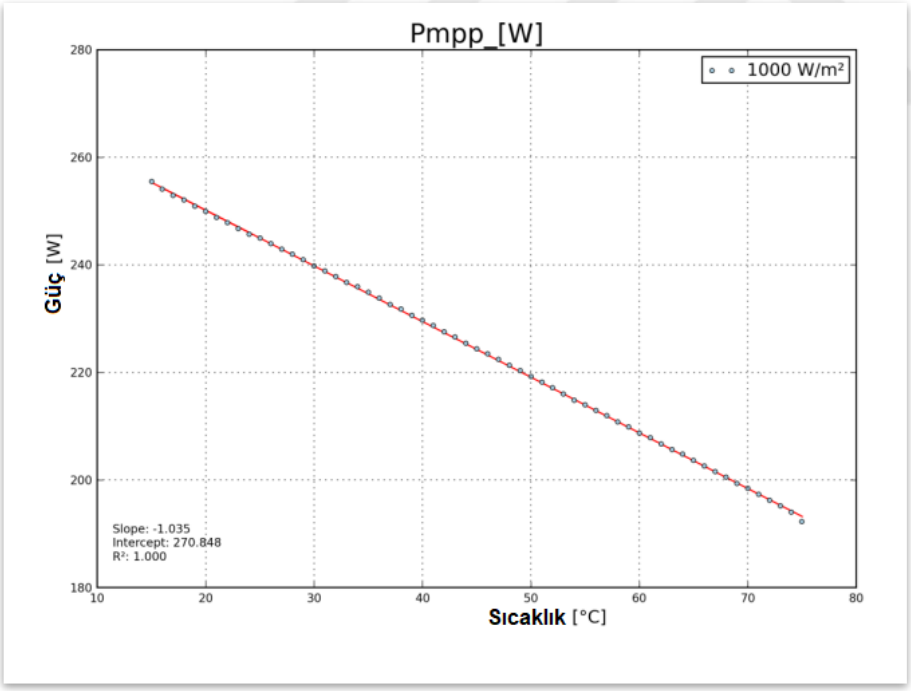


Şekil 3.18. 300 Wp tek c-si FV modül için 1.000 W/m^2 'de sıcaklığa bağlı histerezis hatası değişimi.

Şekil 3.13'de görüldüğü gibi FV modül kapasitesi arttıkça histerezis değişkenliği artmaktadır. En iyi sonuç alınan ölçümlerde histerezis % 0,5 değerinin altında olması gerektiği önemle vurgulanmıştır. Bu değerin altında elde edilmeyen sonuçlar tekrar ölçülür ve yeniden histerezis doğrulaması yapılır.

3.4. Modül Sıcaklık Katsayısının Belirsizliğe Etkisi

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



Şekil 3.19. Güç ölçümünün sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

Laboratuvarlar arası karşılaştırmalar maksimum gücün sıcaklık katsayılarına bağlı olarak ortalama % ±10-15 veya daha büyük oranlarda sapmaları meydana getirdiğini gösterir. Ancak gerçekte yapılan ölçümlerdeki 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. FV modül sıcaklık katsayıları ölçümleri için 1.000 W/m^2'de ve farklı sıcaklıklar altında I-V eğrileri (akım-gerilim) ölçülür. FV modüllün çıkış gücü, modülün çalışma sıcaklığıyla ters orantılır. Yani, FV modülün çalışma sıcaklığı artığı zaman, çıkış gücü düşmektedir (Bkz. Şekil 3.16). FV modüllerin kristal hücre yapılarında gerilim 25°C'den her 1°C sapmada ortalama % -0,5 değişikliğe uğrar. Sıcaklık arttıkça gerilim azalır (EQF/NQF, 2014).

IEC 60904-9 güneş simülator performans prosedürleri gereğince AAA sınıf bir simülator tarafından ölçülen bu eğriler ve hesaplanan sıcaklık katsayıları yine IEC 60904-1 Ed.2 (2006-09) akım gerilim karakteristik ölçümleri prosedürü ve IEC 60891 Ed.2 (2009-12) kristal silisyum FV modüllerin ölçülen I-V eğrilerinin sıcaklık ve ışınım düzenleme prosedürüne göre doğrulanır. Belirlenmiş modül sıcaklık aralığı 1 K aralığı için 25-75 °C arasındadır. Ölçüm sırasında meydana gelebilecek ışınım dalgalanmalarını düzeltmek için ölçüm sırasında ışınım bir referans hücre tarafından kontrol edilir. Tüm bu sıcaklık katsayısı ölçümlerinin sonunda IEC 61853-1 basitleştirilmiş prosedürüne göre şu şekilde belirlenir. İki ayrı FV modülden alınan maksimum güç ve açık devre gerilimi için göreceli sıcaklık katsayısı karşılaştırılır. Eğer alınan iki göreceli sıcaklık katsayısı değeri açık devre gerilimi için % 10 değerine ve maksimum güç değeri için de % 15 değerine yakınsa elde edilen iki sıcaklık katsayısı ölçüm sonucunda belirten çizelgede kullanılabilir. Daha fazla ise her bir set için yeniden ölçüm yapılmadır. Sıcaklık katsayısı sıcaklık artış ve düşüşünde alınır. Sıcaklığın homojen bir şekilde belirlenmesi için FV modül arkasına yapıştırılan 4 adet Pt100 sıcaklık sensörü ile denetlenmiştir. Bu özellikler dikkate alarak yapmış olduğumuz aynı markaya ait 295 Wp'lik tek c-si XXX013 ve XXX021 FV modülleri için histerezisli ve histerezissiz güç ölçüm değerleri şağıda verilmiştir.

Çizelge 3.3. XXX013 (Histerezis kayıpları yok) FV modül sıcaklığa bağlı P_{mpp} ve verimlilik değerleri.

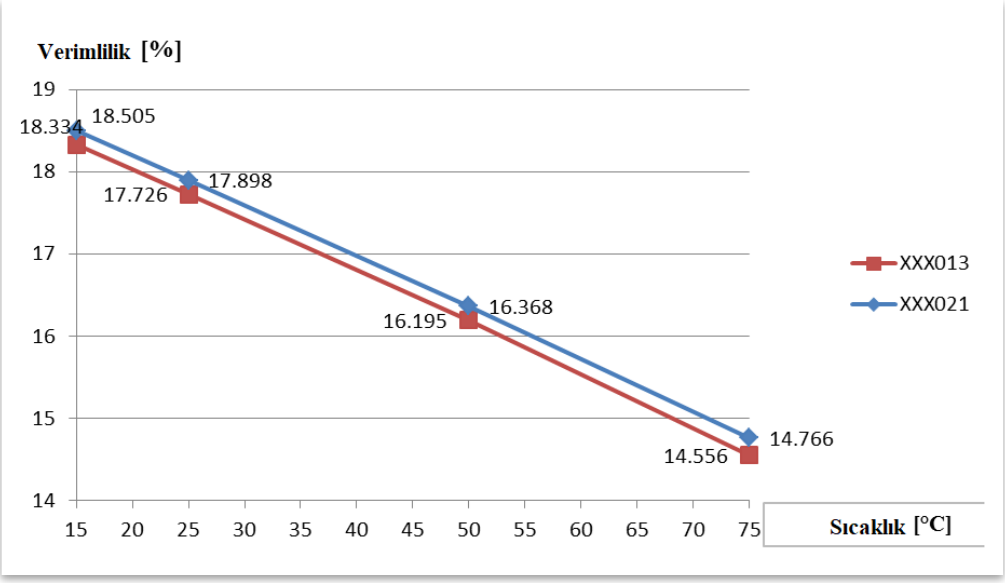
Sıcaklık	P_{mpp} [W]	Verimlilik [%]
15 °C	**300,685**	**18,334**
25 °C	**290,711**	**17,726**
50 °C	**265,604**	**16,195**
75 °C	**238,723**	**14,556**
Bağıl Sıcaklık Katsayısı [%/K]	**-0,355**	**-0,355**

Bu ölçüm 74,1 ms'de ve tek kadran taramalı akım-gerilim ölçümünden gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.4. XXX021(Histerezis kayıpları var) FV modül sıcaklığa bağlı Pmpp ve verimlilik değerleri

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 Sıcaklık Katsayısı [%/K]	**-0,348**	**-0,348**

Bu ölçüm 600,0 ms'de ve dört kadran taramalı (ileri ve geri yönde) akım gerilim ölçümünden gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi her zaman histerezisli FV modül ölçümlerinde sıcaklık katsayısı daha küçük olacaktır.



Şekil 3.20. Farklı sıcaklık noktaları için XXX021 (histerezis kayıpları var) ve XXX013 (histerezis kayıpları yok) FV modülünün sıcaklığa bağlı verimlilik [%] grafiği.

Aynı tip iki FV modülü karşılaştırdığımız zaman her iki modülde de sıcaklığın artması ile birlikte güç ve verimde gözlemlenen düşüş aşikardır. XXX013 FV 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 FV modülü için % 34,8 değerindedir. Her iki modülün sıcak katsayı karşılaştırıldığında ise sapma değeri yaklaşık % 1,30 değerindedir.

3.4.1. Modül arka yüzey ile pn eklemi arasındaki sıcaklık sapması

4 adet sıcaklık Pt 100 sensörü ile FV modül arka yüzeyinin sıcaklığı ölçülür. Gerçek hücre sıcaklığı için V_{oc} ve V_{oc}'in sıcaklık katsayısı ile hesaplanır. Sapma değerlerini elde etmek için ölçülen sıcaklık ile gerçek hücre sıcaklığını karşılaştırırız. Bu değer ölçüm sonuçlarında 0,001 değerinde çıktığı için belirsizliğe olan etkisi göz ardı edilecektir.

Çizelge 3.5 XXX013 FV modülü için farklı sıcaklık noktalarındaki güç ölçümü ve STC'ye göre oranı

G [W/m²]	Pmpp [W]				
	15°C	**25°C**	**47°C**	**50°C**	**75°C**
1100		319,1		291,7	262,6
1000	300,7	290,2		264,5	238,7
900	270,5	261,2		238,3	214,9
800	240	231,9	214,6	211,3	190,8
700	209,7	202,6		184,6	166,3
600	179,1	172,9		157,7	141,9
500	148,2	143		130,3	
400	117,6	113,4		103,1	
300	87,3	83,8			
200	56,3	54,3			
100	26,8	25,8			
G [W/m²]	**Pmpp [%] (STC'ye göre)**				
	15°C	25°C	47°C	50°C	75°C
1100		10,0		0,5	-9,5
1000	3,6	0,0		-8,8	-17,7
900	-6,8	-10,0		-17,9	-25,9
800	-17,3	-20,1	-26,1	-27,2	-34,3
700	-27,7	-30,2		-36,4	-42,7
600	-38,3	-40,4		-45,6	-51,1
500	-48,9	-50,7		-55,1	
400	-59,5	-60,9		-64,5	
300	-69,9	-71,1			
200	-80,6	-81,3			
100	-90,8	-91,1			

FV modül kalibrasyonu sırasında modül arka yüzeyinin ve PN eklemi arasında bilinmeyen sıcaklık farkı sıcaklık düzensizliğine neden olur. Ölçüm için bir gereklilik olarak, dört sensörün her birinin sıcaklığı 25 ± 1 ◦C'de olmalıdır. Bu durum da maksimum bir sıcaklık eşitsizliği ile sonuçlanır ve belirsizlik % 4 'dür. Sıcaklığın getirdiği belirsizlik hakkında bilgi yalnızca sıcaklık sensörünün kalibrasyon raporundan elde edilir (ölçüm toleransı: ± maksimum 0,1 K). Ölçüm ve çözünürlük dahil olmak üzere DAQ(sıcaklık sinyali toplama analizi) belirsizliği % 0,327'dir. Ölçümler gerçekleşmeden önce FV modüller laboratuvar ortamında bir kaç saat bekletilerek, modül arka yüzey sıcaklığı ve PN ekleminin birleşme noktası farkının ± 0,1 K'dan az olması beklenir, bu durumda STC'de % 0,231 belirsizlik değeri oluşur.

Çizelge 3.6 XXX021 FV modülü için farklı sıcaklık noktalarındaki güç ölçümü ve STC'ye göre oranı

G [W/m²]	Pmpp [W]				
	15°C	**25°C**	**47°C**	**50°C**	**75°C**
1100		322,3		295,2	266,0
1000	303,5	293,5		268,4	242,2
900	273,2	264,3		241,8	218,3
800	243,0	235,0	217,7	215,1	194,2
700	212,5	205,5		187,9	169,8
600	181,9	175,8		160,8	145,3
500	151,2	146,0		133,5	
400	120,1	115,9		106,1	
300	89,1	86,0			
200	58,3	56,2			
100	27,9	26,7			
G [W/m²]	**Pmpp [%] (STC'ye göre)**				
	15°C	25°C	47°C	50°C	75°C
1100		9,8		0,6	-9,4
1000	3,4	0,0		-8,5	-17,5
900	-6,9	-9,9		-17,6	-25,6
800	-17,2	-19,9	-25,8	-26,7	-33,8
700	-27,6	-30,0		-36,0	-42,1
600	-38,0	-40,1		-45,2	-50,5
500	-48,5	-50,2		-54,5	
400	-59,1	-60,5		-63,8	
300	-69,6	-70,7			
200	-80,1	-80,9			
100	-90,5	-90,9			

Gerçek ortalama sıcaklık ve dört sensörün ortalaması bir sonucu olarak sıcaklık farkının ± 0,1 K'dan az olduğu durumlarda FV modülün bekletilmesinin ardından elde edilen sonuç modül sıcaklığındaki belirsizlik 25 ˚C'ye yakın sıcaklık seviyeleri için % 0,517 ile sonuçlanır.

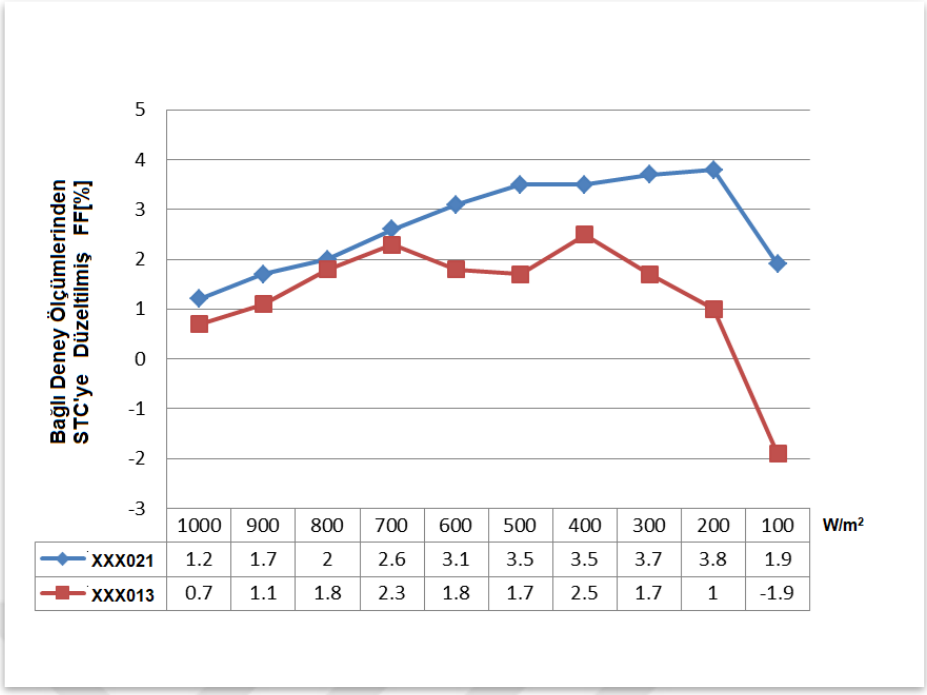
3.5. Doluluk Çarpanı

FV modülün belli bir ışınım şiddeti altında hesaplanan en büyük Vmpp x Impp değerinin V_{oc} x I_{sc}'ye oranı olarak tanımlanır. Yani en yüksek çıkış gücünün, açık devre gerilimi ile kısa devre elektrik akımı çarpımına oranı doluluk çarpanını verir. Doluluk çarpanı genellikle bir FV modülün elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılır**.** Dolum çarpanı (fill factor, FF): Daha çok "FF" kısaltmasıyla bilinir. Grafiksel olarak, FF, bir FV modülün I-V eğrisinin "köşeli olma" ölçüsüdür ve I-V eğrisine sığacak en büyük dikdörtgenin alanıdır.

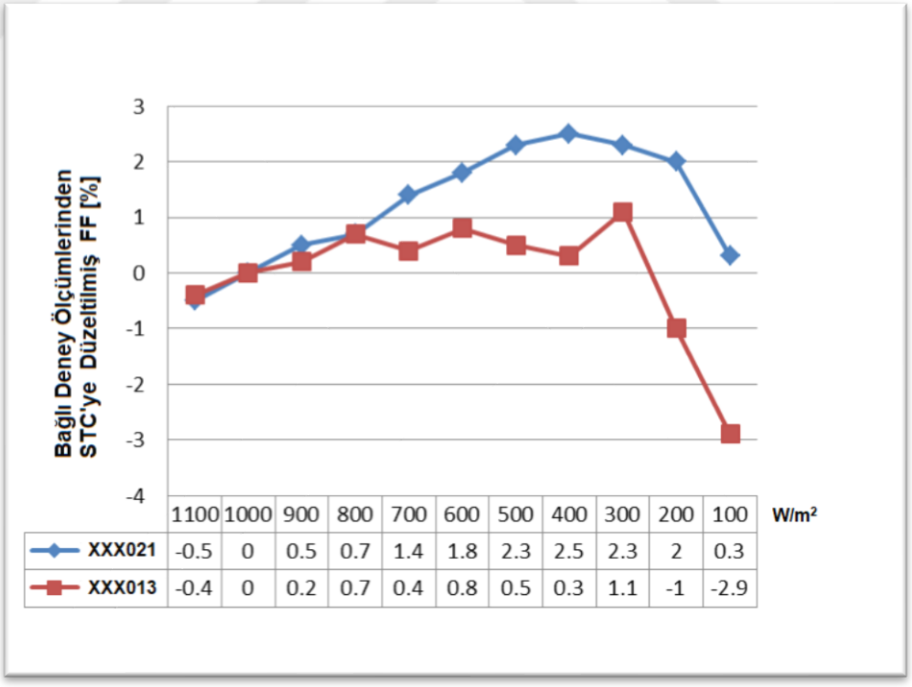
$$FF\ [\%] = \frac{P_{mpp}}{P_t} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad \text{(Denklem 9)}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Güç ölçümlerindeki belirsizliği anlamanın en belirgin yolu FV modülün doluluk çarpanı (FF) oranındaki ölçüm sapmalarına bakmaktır. Çünkü FF değeri maksimum gücün t anındaki güce oranıdır. I-V eğrisinin en önemli belirsizlik parametrelerinden olan histerisiz bu anlamda dolum oranına (FF) etkisini incelemek adına 100-1.100 W/m^2 ışınım aralığında farklı sabit sıcaklık noktaları için sırasıyla ve XXX021 (histerezis var) ve XXX013 (histerezis yok) FV modüllerin FF [%] ölçümleri yapılmıştır. Bu deneyleri sırasıyla 15°C ve 25 °C sıcaklık için yaparak standart test koşulları dışındaki durumlar için de sıcaklık parametrelerinin farklı ışınımlar üzerinde FV modül gücünü nasıl etkilediğini araştırılmıştır.

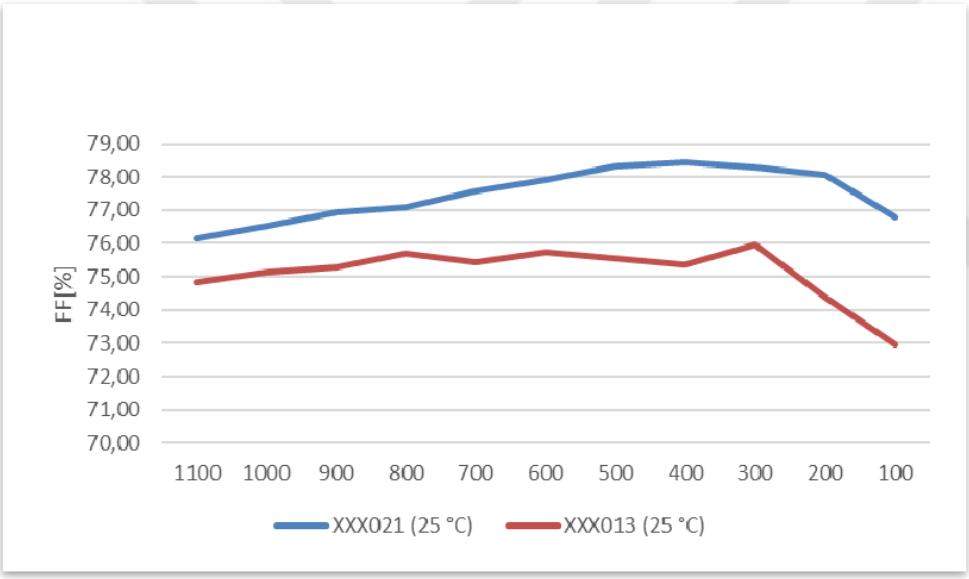


Şekil 3.21. 15 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerezis hatası var) ve XXX 013 (histerezis hatası yok) doluluk çarpanının ışınıma bağlı grafiği.



Şekil 3.22. 25 °C sıcaklık altında XXX 021 (histerezis hatası var) ve XXX 013 (histerezis hatası yok) doluluk çarpanının ışınıma bağlı grafiği.

Histerisiz kayıpları öngörülerek ölçülmüş olan mavi renkli grafik doğru ölçüm sonucu verir. Şekil 11'de görüldüğü üzere 25 °C sıcaklık altında her iki FV modülde 1.000 W/m^2 ışınım şiddeti altında aynı FF [%] oranına sahip iken, 100 W/m^2 'ye doğru histerizis hatası öngörülmüş ve histerizis hatası öngörülmemiş grafik için ışınımın giderek azalması Doluluk çarpanı (FF) farkının azalarak arttığını göstermektedir. Buradaki mavi ile belirtilen yani histerizisli olan ölçüm olması gereken "doğru ölçüm" olarak kabul edirken, kırmızı ölçüm ise histeriz hatası göz ardı edilmiş olduğu daha az FF yüzdesine sahip ve sapma gösteren ölçümdür. Histerizis hatasından kaynaklanan belirsizlik direkt olarak FV modül gücünü etkiler, modül gücündeki değişim ise en doğru FF [%] değişimi ile gözlemlenir.



Şekil 3.23. 25°C sıcaklık altında XXX021 (histerezis hatası var) ve XXX013 (histerezis hatası yok) FV modülü için ışınımına bağlı verimlilik [%] grafiği.

Şekil.3.20, histerisizin FV modül verimliliğini direkt etkilediğini açıkça gösteren bir grafiktir. 25 °C altında yapılan bu ölçümde her iki FV modül için de hesaplanan standart sapma değerine iki modül için de verimlilik değeri arasındaki fark yaklaşık % 2 değerindedir.

P_{mmp} değerindeki belirsizlik histerizise göre ifade edilir. P_{mpp} değerini anlamanın en doğru yolu da yine FF oranına bakmaktır. Bu anlamda aynı tip iki FV modülün histerizisli olup olmayışına bağlı olarak hesaplanan doluluk çarpanı (FF) ölçümlerine göre P_{mmp} (Maksimum güç) noktasındaki fark, düşük ışınımlar altında yapılan ölçüm belirsizliği yüzdesini verir. Histerezis hatası öngörülmeyen tek yönlü ölçümlerde normalden daha fazla belirsizlik değeri elde edildiği gerçeğini yansıtır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, FV modüllerde güç ölçümünün belirsizliğine etki eden tüm parametreler detaylıca ele alınarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda çıkan değerler, EXCEL programında birleşik belirsizlik yöntemi ile hesaplandığında tüm I-V karakterleri de ne derece etkilediği görülmektedir. Işınım ve FV modül sıcaklık katsayısının yarattığı her bir belirsizlik değerinin modülün akım- gerilim grafiğine etki ettiği belirsizlik(k=2) EXCEL cetveline iletilir. Bu belirsizlikler standart test koşullarında ve standart test koşulları dışında olarak iki ayrı şekilde sonuçlandırılmıştır.

- Spektral ışınım uyuşmazlığı belirsizlik hesabı için 100-1,000 W/m^2 aralığında farklı c-Si FV modüller için STC ve STC dışında ölçümler yapılmış ve maksimum MM değeri bulunarak STC dışı durumlar için yüksek belirsizlikte olduğu ortaya çıkmıştır. Çoğu pratik durumda, MM belirsizlik değeri % 3'den daha yüksek olacaktır. Spektral dağılım etkisinin belirsizlik değerini kısmen de olsa düşürmek adına FV hücrelerin etkin ışınım ile mevcut eşleşmesi sırasında yapılan ölçümün en başında MM faktörü değeri ölçüm başında eklenerek belirsizlik değeri azaltılabilir.

- Işınımın eşdağılımsızlık ve belirsizlik değerini ortaya koyabilen en büyük kaynak, bu test sırasında FV modül ölçüm standına ortalı olarak yerleştirilen referans hücredir. Referans hücrenin bu test sırasında doğru konumandırılması ve birincil derece kalibre edilmiş olması önem arz eder.

- Voc ve ölçülen sıcaklık karşılaştırılır, ölçülen sıcaklık sonuçlarının farklılığı ve standart sapması hesaplanarak sıcaklık belirsizlik katsayısı belirlenir.

- Modül arka yüzey ve ön yüzeyi arasında sıcaklık farklılığının yarattığı belirsizlik, standart şartlar dışında daha yüksek çıkmıştır. Tek c-Si ve çoklu c-Si FV modüller üzerinde yapılan bu testler sonucu belirsizlik % 1,3 değerinde belirlenmiştir. Cam-cam, çerçevesiz FV modüller için sıcaklığın etki ettiği bu değerin daha da yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Sıcaklığa bağlı belirsizliklerin yayılımı, temel olarak bir FV modülün sıcaklık katsayılarıyla orantılıdır.

- FV modüllerin, sıcaklık ölçümü sırasında EVA malzemesinden sonra polimerik bir arka tabakaya sahip moleküler bir tabaka ile

karşılaştırıldığında PN eklemi ile arka yüzey arasındaki maksimum fark STC ve STC Dışı Koşullarında ± 0.1 K yerine ± 0.4 K olduğu tahmin edilmektedir.

- Açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum güç değeri, doluluk faktörü ve verimlilik gibi FV modül karekterizasyonları en çok sıcaklığın değişiminden etkilenirken, bu değişim en yüksek düzeyde açık devre geriliminde gerçekleşir. FV modülün açık devre gerilimi modül sıcaklığına karşı oldukça duyarlıdır. Açık devre gerilimi, doluluk çarpan oranını verirken yüksek sıcaklıkta çıkış gücü azalırken, kısa devre akımı ise sıcaklık artması ile artar. Bu nedenle, sıcaklık katsayısı açık devre gerilimi, dolum faktörü ve en yüksek güç çıkış değeri için negatif ve kısa devre akımı için pozitif değerdedir. Sonuç olarak FV modülün sıcaklığındaki artıştan en çok etkilenen parametre %0.7 ile STC dışında açık devre gerilimidir.

- P_{mpp} için histerisiz hata değeri standart test koşulları dışında % 2'dir. Bu belirsizliğin esas nedeni düşük ışınım şiddeti ve yüksek sıcaklık altında yüksek kapasteli FV modül kararlılığının kısa süreli ölçümlerde sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Histerisiz kayıpları faktörünü azaltmak için yüksek kapasiteli FV modüllerin ölçüm zamanı arttırılmalıdır.

- Test edilen FV modül spektrum tepkisinin daha iyi karakterize edilebilmesi açısından yakın gelecekte belirsizlikte bir düşüş beklenmektedir. İkinci önemli nokta ise, belirsizliği arttıran kısa zaman istikrârıdır. Bu durumun farklı FV modül teknolojileri arasında farklılık göstermesi de muhtemeldir. Bu nedenle, ölçüm belirsizliğinin azaltılabilmesi FV modül davranışına ve bunun yanı sıra kararsızlık etkilerini azaltmak için ölçüm yöntemine bağlı ölçüm şartlarını geliştirmeye bağlıdır.

- Tez kapsamında ele alınan ölçümlerle ilgili daha fazla veya daha az belirsizliği belli bir grup için farklı teknoloji FV modül belirsizlikleri olarak ifade etmek önemlidri. Bir FV modül kalibrasyonunun sonuçları arasındaki olası fark, berlirsizliğin neden olduğu farkındalık için gereklidir.

- Sonuç olarak, FV modüllerin kalibrasyonu ile ilgili detayları ele alırken şunlar genel hatları ile göz önünde bulundurulmalıdır: Referans hücre ve doğru kalibre edilmiş olması, kalibrasyon sırasında FV modül karakterizasyonu için gerekli tüm elektriksel girdi parametreleri, bir sonraki

ölçümler için belirsizlik değerindeki saptamayı referans olarak kullanmak, etki eden tüm faktörleri bileşik belirsizlik olarak ele almak önemlidir. Ayrıca FV modülün güç ölçümü için güç çıkış değerindeki kararlılığı zorunludur. Tüm bu ölçümler sırasında uygun test koşullarında ve ortam sıcaklığının optimum olması beklenir. Bunlara ek olarak FV modüllerin laboratuvara ilk gelişi sırasında sevk operasyonu maksimum özenle yapılmış olması önemlidir. Özensiz sevk FV modüllerde gözle görülemeyen mikro çatlaklara neden olarak FV modül verimini düşürecektir.

Çizelge 4.1. Güç değerlendirme ölçümleri için belirsizlik tahminleri.

Güç değerlendirme ölçümleri için belirsizlik tahminleri	**STC [%]**	**STC dışında [%]**
Spektral uyuşmazlığı [%]	0,95	3
Referans hücre ve FV modül arasında ışınım homojensizliği [%]	0,33	0.,5
FV modül arka yüzey ile PN eklemi arasındaki sıcaklık (T) sapması [%]	0,4	0,4
Sıcaklık farklılığı [°C]	0,1	1,3
Işınım homojensizliği [%]	1,0	1,5
P_{mpp} için histerisiz [%]	0,2	2

Çizelge 4.2. Belirsizliğin etki ettiği I-V parametreleri.

Belirsizliğin etki ettiği parametler	**STC [%]**	**STC dışında [%]**
Isc	1,9	3,2
Impp	2,1	3,4
Voc	0,6	0,7
Vmpp	1,0	1,0
Pmpp	2,1	**4,1**
FF	1,5	2,8

Bu sonuçlar altı aylık bir çalışma sonucu bağımsız ve akretide bir laboratuvarda elde edilen ölçüm ve araştırmalar sonucu belirlenmiştir. Elde edilen tüm bu veriler birleşik belirsizlik yöntemi ile genişletilmiş (k=2) EXCEL programında formülize edilerek aşağıdaki tablo elde edilmiş ve standart şartlar içinde ve dışında bu belirsizliklerden etkilenen parametreler sunulmuştur.

- Belirsizliğin etki ettiği en yüksek I-V karakter parametreleri arasında P_{mmp} % 4,1 ile standart şartlar dışında dikkat çekmektedir. Bu farklılığın en büyük nedeni olarak spektral uyuşmazlığın STC dışında belirsizliğe etki eden en büyük payı almasıdır.

- Doluluk çarpanı, % 2,8 ile belirsizliği ile ardışık belirsizliğin etki ettiği parametreler arasında ikinci sırada yer almaktadır. Doluluk Çarpanı bir FV modülün verimlilik tahmini için önem arz etmektedir. Düşük ışınım değerlerindeki belirsizliklerin doluluk çarpanını etkilediği düşünülürse önemli belirsizlik değerleri arasındadır.

- Standart şartlar dışında, Voc % 0,7'dir. Bunun en büyük nedeni ise, güç ölçümleri sırasında sıcaklık farklılığında belirsizliğin neden olduğu % 1,3 değeridir.

- Gelecek çalışmalarda, ölçüm belirsizliğinin özellikle geleneksel olan FV modül teknolojileri için en aza indirgenmesi hedeflenmelidir. Farklı modül teknolojilerinin gelişmesiyle beraber laboratuvar testlerine göre seçilerek daha detaylı sunulması ve gerçek ortam üretimi verilerine göre simülasyon verilerinin sapma oranlarının daha aza indirgenmesini sağlanabilir.

- Özellikle birleşik parametrelerin neden olduğu histerisiz kayıpları kaynaklı güç ölçümlerinde büyük belirsizliklere sebep olduğu ve ölçüm sonuçlarını direkt etkilediği akretide laboratuvarlarca ölçüm esnasında dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

D.Dirnberger, U. Kräling, 2013, Uncertainty in PV Module Measurement Part I: Calibration Of Crystalline and Thin Film Modules, IEEE Journal Of Photovoltaics, Volume 3(3), 1016-1026 pp.

K.A. Emery, 1987, Uncertainty Analysis of Photovoltaic Efficiency Measurements, Article in Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Volume 1, 153-159 pp.

J.H.Ebinger, W.Warta, 2011, Uncertainty of the Spectral Mismatch Correction factor in STC Measurements on Photovoltaic Devices, Progress In Photovoltaics: Research And Applications, Volume 19, 573-579 pp.

H. Mullejans, W. Zaaiman and R. Galleano, 2009, Analysis and Mitigation of Measurement Uncertainties in The Traceability Chain For The Calibration of Photovoltaic Devices, Measurement Science and Technology, Volume 20, 7 p.

Q. Gao , Y. Zhang , Y. Yu, F. Meng, and Z. Liu, 2018, Effects of I–V Parameters on The Hysteresis Effect and Optimization in High-Capacitance PV Module Testing, IEEE Journal Of Photovoltaics, Volume 8(3), 710-718 pp.

M. Herman, M. Jankovec, and M. Topic, 2012, Optimal I-V Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level, International Journal of Photoenergy, Volume 2012, 11 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

H. Liu, D. Wen, W. Zhao, X. Wang, W. Jiang, 2013, Intercomparison Measurement Of Crystalline Silicon PV Modules in Test Laboratories Of China, IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).

W.Hermann, W. Wiesner, 2000, Modelling PV Modules-The Effects of Non Uniform Irradiance On Performance Measurements With Solar Simulators, 16th European Photovoltaics Solar Energy Conference.

D.L. King, J.A. Kratochvil, and W.E. Boyson, 2002, Temperature Coefficents For PV Modules And Array, Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

D. Polverini, R. Galleano, 2012, The Use Of Fast Spectroradıometers For Pulsed Solar Simulator Spectral Measurements, 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference in Seattle, WA, USA.

E.Salisa, D.Pavanelloa, M.Fielda, U.Kräling, F.Neuberger, K.Kiefer, C.Osterwald, S.Rummel, D.Levi, Y.Hishikawa, K.Yamagoe, H.Ohshima, M.Yoshita, H.Müllejans, 2017, Improvements in world-wide intercomparison of PV module calibration, Solar Energy , Volume 155, 1451-1461 pp.

IEC, 2016e, IEC 61215–1 Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval - Part 1: Test Requirements International Electrotechnical Commission, Geneva (2016), Google Scholar.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

ISO, 2005, ISO/IEC 17025:2005 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories International Organization for Standardization, Geneva (2005) , Google Scholar.

ISO, 2010, ISO/IEC 17043:2010 Conformity Assessment – General Requirements for Proficiency Testing International Organization for Standardization, Geneva (2010) Google Scholar.

D.H. Levi, C.R. Osterwald, S. Rummel, L. Ottoson, A. Anderberg., **2017,** Self-Reference Procedure to Reduce Uncertainty in Module Calibration, 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2017. Washington, DC.

G. Makrides, B. Zinsser, M. Norton and G.E. Georghiou, 2012, Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions, Open access peer-reviewed chapter.

J. Lopez-Garcia, T. Sample, 2018, Evolution of measured module characteristics versus labelled module characteristics of crystalline silicon based PV modules, Solar Energy, Volume 160, 252-259 pp.

D. Dirnberger, B. Müller, C. Reise, 2015, On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV technologies due to varying spectral irradiance, Solar Energy, Volume 111, 82-96 pp.

D. Dirnberger, J. Bartke, A. Steinhüser, K. Kiefer, F. Neuberger, 2010, Uncertainty Of Field I-V-Curve Measurements In Large Scale PV-Systems, 25th EU PVSEC, Valencia.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

K. Whitfield C. R. Osterwald, 2001, Procedure for Determining the Uncertainty of Photovoltaic Module Outdoor Electrical Performance, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 87-102 pp.

J.M. Carrillo,F. Martínez-Moreno,C. Lorenzo, E.Lorenzo, 2017, Uncertainties on the outdoor characterization of PV modules and thecalibration of reference modules, Instituto de Energía Solar, ETSIS Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid, Spain, Solar Energy, 880-892 pp.

IEC 60904-1 Ed.2 (2006-09): Fotovoltaik modüller - Bölüm 1: Fotovoltaik akım-gerilim özelliklerinin ölçümü.

IEC 60904-3 Ed.3 (2016-04): Fotovoltaik modüller - Bölüm 3: Referans spektral ışınım verisine sahip karasal fotovoltaik (FV) modüller için ölçüm prensipleri.

IEC 60904-7 Ed.3 (2008-11): Fotovoltaik modüller - Bölüm 7: Fotovoltaik modüllerin ölçümleri için spektral uyumsuzluk düzeltmesinin hesaplanması.

IEC 60904-8 Ed.3 (2014-05): Fotovoltaik modüller - Bölüm 8: Bir fotovoltaik (FV) modülün spektral duyarlılığının ölçümü.

IEC 60904-9 Ed.2 (2007-10): Fotovoltaik modüller - Bölüm 9: Güneş simülatörü performans gereksinimleri.

IEC 60891 Ed.2 (2009-12): Kristal silisyum fotovoltaik modülün ölçülen I-V özelliklerine göre sıcaklık ve ışınım düzeltmeleri için prosedürler.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

NREL, http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe.html, (Erişim tarihi: 01 Temmuz 2019).

TSE CLC/TS 61836, 2010, Fotovoltaik güneş elektriği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller, 77 s.

AIST, https://www.aist.go.jp/fukushima/en/unit/PPT_e.html (Erişim tarihi : 27 Haziran 2019).

EQF/NQF Renewable Energy Specialists-RES-2, 2014, Fotovoltaik Güç Sistemleri Kurulum ve Devreye Alma.

TEŞEKKÜRLER

Bu yolda en iyi sonuç almam için desteklerini asla esirgemeyen ve özveriyle yanımda olan canım eşim ve bu zamanda kadar maddi manevi her zaman arkamda olan annem, babam ve kardeşime, en önemlisi de başarıya giden yolda vizyoner kararlar almamdaki en büyük katkıyı sağlayan değerli akademik danışmanım Mete Çubukçu'ya ve ayrıca destekleri için Klaus Kiefer ve Alexandra Schmid'e sonsuz teşekkürler...

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı:	Gonca DÜLGER BEDELOĞLU
Doğum Tarihi – Yeri:	06.02.1991 - ANTALYA
Uyruğu:	T.C.
Tel:	0 553 567 83 52
E-mail:	dulger.gonca@gmail.com
Adres:	Gazi Bulv. Kızılarık Mah. 290/1 Muratpaşa ANTALYA

AKADEMİK GEÇMİŞİ

Lisans: Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2016).

MAKALELER

Alexandra Schmid, Gonca Dülger, Ghassan Baraah, Ulli Kräling, 2017, I-V Measurement of Bifacial Modules: Bifacial vs. Monofacial Illumination, 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam-The Netherlands.

BİLDİRİLER

Gonca Dülger , Yrd. Doç. Dr. Mete Çubukçu, Dipl. Phys. Alexandra Schmid, 2017, Fotovoltaik Modüllerin Güç Ölçümü Belirsizliklerinin Analizi, EMO V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre Ve Sergisi, İzmir-Türkiye.