

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NEMLİ ISI TESTİ ALTINDA FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE
DEGRADASYON KİNETİĞİNİN MODELLENMESİ

MELİKENUR GENÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ABDÜLKERİM GÖK

TEMMUZ 2024

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NEMLİ ISI TESTİ ALTINDA FOTOVOLTAİK
MODÜLLERDE DEGRADASYON KİNETİĞİNİN
MODELLENMESİ**

MELİKENUR GENÇ

**YÜKSEK LİSANS
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ABDÜLKERİM GÖK

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

MODELING OF DEGRADATION KINETICS IN
PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER DAMP HEAT TESTING

MELIKENUR GENC

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

ADVISOR: ASST. PROF. ABDULKERIM GOK

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Melikenur Genç'in tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Abdülkerim GÖK

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Özgün YÜCEL

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet UNUTULMAZ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Gitgide artan CO₂ emisyonları, çevre kirliliği, iklim krizleri beraberinde temiz enerjiye olan ihtiyacı getirmiştir. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynağı arayışı birçok araştırmanın odak noktası olmaktadır. Güneş enerjisi, erişimi kolay, maliyeti uygun ve çevre dostu olmasından dolayı en çok odaklanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Fotovoltaik paneller güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirmekte kullanılan cihazlardır. Bu paneller, yapısında ön/arka tabakalar, kapsülleyici polimerler, güneş hücreleri, bağlantı kutusu ve çerçeve bulundurur. Günümüzde fotovoltaik paneller için yaklaşık 30 yıl kadar performans garantisi verilmektedir. Fotovoltaik panellerin performansı ve kullanım ömrü nem, sıcaklık, UV ışınları gibi dış dünyada maruz kaldıkları streslere karşı dayanıklılığına bağlıdır. Panelin özellikle nem ve sıcaklığa maruz kalması ile yapısında çeşitli degradasyon mekanizmaları ortaya çıkar. Bunlardan en yaygını potansiyel kaynaklı degradasyon ve hücre metalizasyonunda korozyondur. Bu iki degradasyon çeşidi panelin performans kaybetmesine yol açar ve kullanım ömrünü kısaltır.

Günümüzde fotovoltaik panellerde en çok kullanılan kapsülleyici malzeme etilen vinil asetat polimeridir. Etilen vinil asetat, nem ile teması geçtiğinde kolayca hidroliz reaksiyonlarına uğrayan bir polimerdir ve bunun sonucunda asetik asit oluşturur. Asetik asit meydana gelmesi korozyonu hızlandırdığı için panel gücünün daha hızlı azalmasına sebep olur. Bu sebeple, etilen vinil asetat alternatifi polimerler üzerine araştırmalar yapılmaktadır. İyonomer, poliolefin elastomer ve termoplastik poliolefin tabanlı polimerler, asetik asit meydana getirmedikleri için alternatif kapsülleyici malzeme olarak dikkat çekmektedir.

Bu çalışma, etilen vinil asetat, iyonomer, poliolefin elastomer ve termoplastik poliolefin polimerleri kullanılarak hazırlanan fotovoltaik panellerin 5000 saatlik nemli-ısı testi altında performans kaybını ve degradasyon kinetiklerini belirlemek için modelleme çalışmalarını içermektedir. Sonuçlar, etilen vinil asetat kullanılan panellerdeki önemli düzeyde bozulmaya rağmen, alternatif polimerler ile hazırlanan panellerin stabilite gösterdiğini ortaya koymaktadır. Akım-gerilim eğrilerinin analizi ve Ağ Yapısal Eşitlik Modeli'nin uygulanması, nemli-ısı testinin neden olduğu degradasyon mekanizmaları ile elektriksel parametreler arasındaki karmaşık ilişkilere dair bilgiler sağlamaktadır. Panelin gücü ile seri direnç ve dolgu faktörü parametreleri arasında güçlü korelasyonlar tespit edilmiştir. Bu çalışma, kapsülleyici seçiminin ve panel yapısı içine nem girişinin önlenmesinin kritik rolünü vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Paneller, Degradasyon, Kapsülleyici Polimerler, Nemli-Isı Tes

ABSTRACT

Rising CO₂ emissions, environmental pollution, and climate crises have increased the need for clean energy. Consequently, the search for renewable energy sources has become the focus of many studies. Solar energy, due to its easy accessibility, cost-effectiveness, and environmental friendliness, has become one of the most focused-upon renewable energy sources. Photovoltaic modules are devices used to convert solar energy into electrical energy. These modules consist of front/back layers, encapsulating polymers, solar cells, a junction box, and a frame. Nowadays, photovoltaic modules come with a performance warranty of about 30 years. The performance and service lifetime of photovoltaic modules depends on their durability against environmental stresses such as humidity, temperature, UV radiation that they are exposed to during outdoors. Especially, exposure to humidity and temperature can lead to various degradation mechanisms within the module construction. The most common of these are potential-induced degradation and corrosion in solar cell metallization. These two types of degradation lead to a loss of module performance and a reduced service lifetime.

Currently, the most widely used encapsulant polymer in photovoltaic modules is ethylene vinyl acetate. Ethylene vinyl acetate is a polymer that easily undergoes hydrolysis when in contact with moisture and forms acetic acid. The formation of acetic acid accelerates corrosion, leading to a faster decrease in module power. Therefore, alternative polymers to ethylene vinyl acetate for module encapsulation are currently being investigated. Ionomer, poliolefin elastomer, and thermoplastic poliolefin based polymers are among the highly focused alternatives because they do not produce acetic acid.

This study includes modeling efforts to determine the performance loss and degradation kinetics of modules encapsulated with ethylene vinyl acetate, ionomer, poliolefin elastomer, and thermoplastic poliolefin under 5000 hours of damp heat testing. The results revealed that, although significant power degradation was observed in the modules with ethylene-vinyl acetate encapsulants, the modules with alternative encapsulant polymers demonstrated stability. The analysis of current-voltage curves and the application of structural equation modeling provided insights into the complex relationships between damp heat induced degradation mechanisms and electrical parameters. Strong correlations were found between module power and parameters such as series resistance and fill factor. This study emphasizes the critical role of encapsulant selection and the prevention of moisture ingress into the module construction.

Keywords: Photovoltaic Modules, Degradation, Encapsulant Polymers, Damp Heat Test

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, 120N520 no'lu Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurulu (TÜBİTAK) projesi tarafından desteklenen PV40+ isimli Solar Era.NET projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans sürecimde bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden danışmanım Sayın Dr. Abdülkerim Gök'e, göstermiş olduğu sabır, ilgi ve değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sürecinde tavsiyeleri ile çalışmamı geliştirmemde katkıları bulunan Dr. Özgün Yücel ve Dr. Ahmet Unutulmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu süreçte sürekli yanımda olan ve her zaman desteklerini hissettiren aileme ve arkadaşlarıma anlayışları ve teşvikleri için en içten teşekkürlerimi iletmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Fotovoltaik Etki	2
1.2. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Standart Testleri	5
1.3. Kalifikasyon Testleri	6
1.4. FV Degradasyonuna Sebep Olan Etkenler	6
1.5. FV Degradasyon Mekanizmaları	8
1.6. Yaygın Kullanılan FV Malzemeleri ve Son Teknolojiler	10
1.6.1. Güneş Hücreleri	10
1.6.1.1. Silisyum Bazlı FV Hücreler	10
1.6.1.2. İnce Film FV Hücreler	11
1.6.1.3. Gelişmekte Olan Teknolojiler	11
1.6.2. Ön/Arka Levhalar	12
1.6.3. Kapsülleyici Polimerler	12
1.7. Literatür Taraması, Tezin Amacı ve Katkısı	14
2. MATERYAL VE YÖNTEM	20
2.1. FV Panellerin Üretim İşlemleri	20
2.1.1. DH Testi ve I-V Ölçümleri Alınması	20
2.1.1.1. DH Testi	21
2.1.1.2. I-V Ölçümleri	21
2.1.1.3. I-V Eğrisi	22
2.2. Modelleme Metotları	24
2.2.1. DeneySEL Kinetik Model	25
2.2.2. Boltzmann Büyüme Fonksiyonu Modeli	27
2.2.3. Yapısal Eşitlik Modeli	28
2.2.4. netSEM	30
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
3.1. Farklı Modeller ile Güç Düşüşünün İncelenmesi	33
3.1.1. DeneySEL Kinetik Model	33
3.1.2. Boltzmann Büyüme Fonksiyonu Modeli	37
3.1.3. I-V Eğrilerinin Alınması	37
3.2. netSEM Analizi ve Degradasyon Mekanizmaları	41
3.3. Kenar Sızdırmazlık Bandının Degradasyona Etkisi	44
3.4. Kapsülleyici Malzemenin Degradasyona Etkisi	46

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	61
EKLER	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat
∇	: Delta
μ	: Şekil parametresi
A	: Ön-eksponansiyel sabit
CC	: Cam-Cam
dak	: Dakika
DH	: Nemli-ısı
E _a	: Aktivasyon enerjisi
EVA	: Etilen Vinil Asetat
eV	: Elektronvolt
FF	: Dolgu faktörü
FV	: Fotovoltaik
I-V	: Akım-gerilim
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
I _{MP}	: Maksimum güç akımı
ION	: İyonomer
I _{SC}	: Kısa devre akımı
m	: Metre
MPP	: Maksimum güç noktası
MW	: Mega-watt
netSEM	: Ağ Yapısal Eşitlik Modeli
n	: Nemin performans üzerinde etkisini belirleyen parametre
PID	: Potansiyel Kaynaklı Bozulma
PIB	: Poliizobütilen
P _{MP}	: Maksimum güç
POE	: Poliolefin elastomer
R ²	: Belirleme katsayısı
RH	: Bağıl nem
RMSE	: Kök ortalama kare hatası
R _s	: Seri direnç
sa	: Saat
SB	: Kenar sızdırmazlık bandı
Si	: Silisyum
STC	: Standart test koşulları
t _f	: Hata süresi
TPO	: Termoplastik poliolefin
UV	: Ultraviyole
V _{MP}	: Maksimum güç gerilimi
V _{OC}	: Açık devre gerilimi
W	: Watt
WVTR	: Su buharı geçirgenlik hızı
YEM	: Yapısal Eşitlik Modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Fotovoltaik etki.	3
Şekil 1.2: FV panel bileşenleri.	4
Şekil 2.1: I-V eğrisi.	23
Şekil 2.2: P-V eğrisi.	23
Şekil 2.3: Degradasyon mekanizmalarının şematik diyagramı.	24
Şekil 2.4: YEM yapısı.	29
Şekil 3.1: EVA paneli (a) ve EVA+SB paneli (b) için güç bozulma profili.	34
Şekil 3.2: ION paneli (a) ve ION+SB paneli (b) için güç bozulma profili.	35
Şekil 3.3: POE paneli (a) ve POE+SB paneli (b) için güç bozulma profili.	36
Şekil 3.4: TPO paneli (a) ve TPO+SB paneli (b) için güç bozulma profili.	36
Şekil 3.5: Tüm paneller için test öncesi ve sonrası I-V eğrileri.	38
Şekil 3.6: EVA paneli için netSEM diyagramı.	41
Şekil 3.7: EVA+SB paneli için netSEM diyagramı.	42
Şekil 3.8: EVA paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.	43
Şekil 3.9: EVA+SB paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.	43

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Hızlandırılmış testler ve meydana gelebilecek hata çeşitleri.	6
Tablo 2.1: Panellere uygulanan laminasyon koşulları.	20
Tablo 2.2: netSEM'in kullandığı modeller.	32
Tablo 3.1: Deneysel kinetik modelde elde edilen parametreler.	33
Tablo 3.2: Deneysel kinetik model ile Boltzmann modelinin karşılaştırması.	37
Tablo 3.3: Panellerin başlangıç ve son koşuldaki elektriksel parametreleri.	39
Tablo 3.4: Polimer özellikleri.	47

1. GİRİŞ

21. yüzyılda artan nüfusla beraber enerjiye olan ihtiyaç da gitgide artmaktadır. Günümüzde birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar kullanılmaktadır [1]. Şu anda dünya, enerji ihtiyacının %80’den fazlasını yenilenemeyen enerjiden üretmektedir [2]. Fosil yakıtların kullanılması CO₂ emisyonunu arttırarak, küresel ısınma, çevre kirliliği ve iklim değişiklikleri gibi global sorunlara sebep olmaktadır. Bu sorunları en aza indirmek adına yenilenebilir enerji alanına olan ilgi her geçen yıl artmaktadır [1]-[4].

Yenilenebilir enerji doğada yenilenen ve tükenmeyen kaynaklardan elde edilen enerji türüdür. Bu kaynaklar güneş, rüzgâr, su, jeotermal ve biyokütle gibi doğal süreçler sonucu oluşan kaynaklardır. Yenilenebilir enerji fosil yakıtlara göre çevre dostudur, oldukça düşük düzeyde sera gazı emisyonları oluşturarak enerji sağlayabildiğinden yeşil enerji olarak da bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliği kullandıkça tükenmemeleri ve çevreye zarar vermemeleridir [1], [5], [6].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi en yaygın kullanılanlar arasındadır. Güneş enerji teknolojisi ısıtma, soğutma, aydınlatma, elektrik ve yakıt gibi çeşitli alanlarda yıllardan beri kullanılmaktadır. Evsel ve endüstriyel kullanıma uygun olduğu için oldukça ilgi görmektedir. Güneş enerjisi, erişimi kolay, düşük maliyetli, çevreye karşı kirlilik oluşturmeyen bir enerjidir [2], [5]. Güneş enerjisi şimdiye kadar kullanılan en eski enerji kaynağıdır. Bilinen ilk kullanımı gıdanın kurutulmasıdır. Ardından birçok bilim insanı tarafından çeşitli çalışmalara konu olmuştur [7], [8].

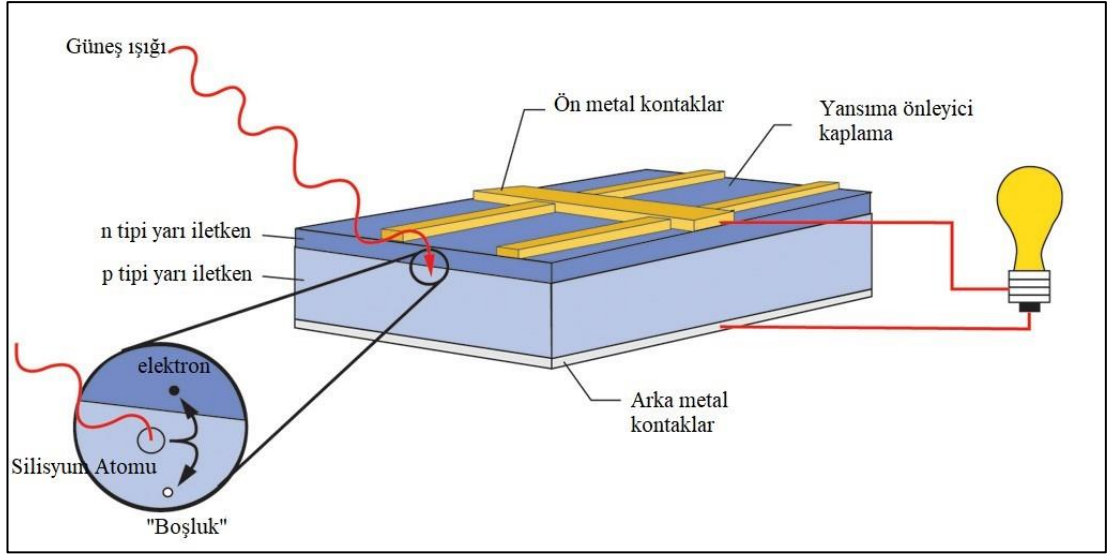
Fotovoltaik (FV) etki, ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel, iki metal elektrotun ışıqla aydınlatıldığında elektrik ürettiğini gözlemlemiştir. Bu keşif, FV teknolojisinin temelini oluşturmuştur [9]. İlk modern silisyum (Si) güneş hücresi, 1954 yılında Bell Laboratuvarları’ndan Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson tarafından geliştirilmiştir. Bu hücreler için verim yaklaşık %6 olarak belirlenmiş ve pratik kullanım için yeterli görülmüştür [10]. 1958’de geliştirilen “yeni nesil” Si hücrelerin dönüşüm verimliliği %11 olarak elde edilmiştir; ancak maliyet açısından avantajlı görülmemiştir. 1960’lı yıllarda ise araştırmalar galyum arsenit gibi diğer FV malzemelerinin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Yeni geliştirilen malzemeler, Si

hücrelerinden daha yüksek sıcaklıkta çalışabilmiştir; buna rağmen, bu hücrelerin de üretilmesi maliyetli bulunmuştur. 1970'lerdeki petrol krizi ile alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Bu dönemde, FV panellerinin verimliliği ve maliyeti üzerinde önemli araştırmalar yapılmıştır. Güneş enerjisi, özellikle uzak ve erişimi zor bölgelerde elektrik sağlama açısından önemli bir seçenek haline gelmiştir [11]. 2000'li yıllarda, FV teknolojisinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Üretim süreçlerindeki iyileştirmeler ve verimlilik artışları, güneş panellerinin maliyetini düşürmüştür. Bu dönemde, ince film ve organik güneş hücreleri gibi yeni teknolojiler de geliştirilmiştir [12]. 2010'lu yıllarda, güneş enerjisi dünya genelinde yaygınlaşmıştır. Büyük ölçekli güneş tarlaları ve bireysel ev kurulumları, FV panellerinin kullanımını arttırmıştır. Bu dönemde, verimlilik %15'in üzerine çıkmış ve yeni malzemeler (perovskitler, organik hücreler vs.) araştırılmaya başlanmıştır [13]. Güneş enerjisi teknolojisindeki devam eden yeniliklerin ve yatırımların, önümüzdeki yıllarda maliyetleri daha da düşürmesi ve kullanımını yaygınlaştırması beklenmektedir.

1.1. Fotovoltaik Etki

FV paneller, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirmekte kullanılan cihazlardır. FV ekipmanları hareketli parçalara sahip değildir ve bu nedenle çok sık bakım gerektirmemektedirler. Kullanım esnasında oluşturdıkları sera gazı ya da başka kirlenici gaz salınımları azdır ve sessiz çalışmaktadırlar. Yaklaşık 20 yıl önce FV'ler, büyük ölçekli ticari uygulamalarda kullanılmaya başlandığında verimlilikleri %20'nin altında elde edilmiştir. Ancak günümüzde verimlilikleri %25'i aşmıştır. Laboratuvar veya deney ünitelerinde ise %30'u aşan verimlilik elde edilebilmektedir; ancak, bunlar henüz ticarileştirilmemiştir [8].

FV sistemleri, miliwattan megawatt'a kadar çeşitli boyutlarda üretilmektedir ve güç kapasitesini arttırmak için daha fazla panel kolayca eklenebilmektedir. Batarya sistemi ile şebekeden bağımsız sistemler olarak da kurulabilmektedirler. Bir FV hücresi, genellikle iki veya daha fazla yarı iletken malzeme katmanından oluşmaktadır. Bu malzemeler için en yaygın olarak Si kullanılmaktadır. Si ışığa maruz kaldığında elektrik yükleri oluşur ve metal kontaklar aracılığı ile doğru akım olarak iletilir. Tek bir hücrenin güç kapasitesi düşük olduğu için birden fazla hücre panel oluşturacak şekilde bağlanmakta ve hücreler dış etkenlerden korumak için kapsüllenmektedir. FV paneli bir FV sisteminin ana yapı taşını oluşturmaktadır [8], [14].



Şekil 1.1: Fotovoltaik etki [15].

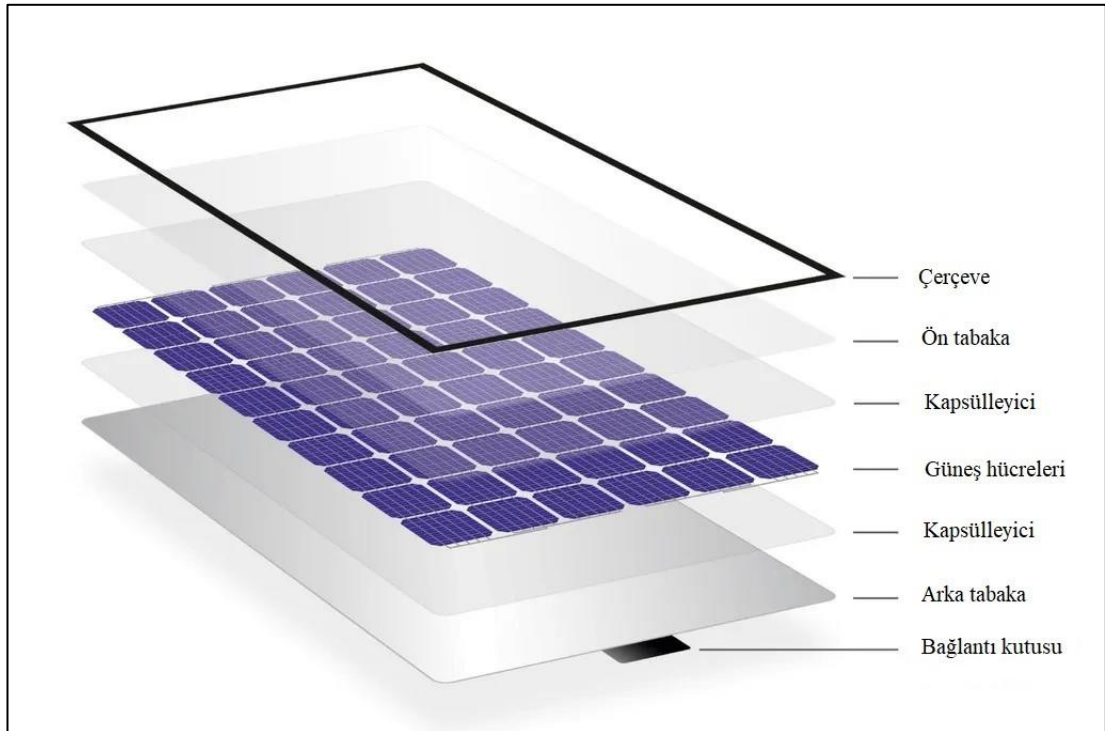
Güneşten gelen ışık, foton adı verilen enerji paketlerinden oluşmaktadır ve bu fotonlar değişik dalga boylarına sahiptir. Görünür ışık, ultraviyole (UV) ışık, kızılötesi ışık gibi birçok farklı dalga boyundaki ışıkların tümü elektromanyetik spektrumu oluşturmaktadır [16], [17]. FV hücreler, kullanılan yarı iletken malzemeye göre genellikle görünür ve yakın kızılötesi bölgesindeki ışığı yakalamaktadır [18]-[20].

Güneşten gelen fotonların güneş hücreleri tarafından soğurularak akım ve gerilim üretmesi ile FV etki gerçekleşmektedir. Tipik bir FV etki Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Güneşten gelen her foton, güneş hücreleri tarafından elektrik üretmek için kullanılmamaktadır. Bir kısmı hücreler tarafından soğurulurken, bir kısmı hücrelerden yansır ve bir kısmı ise hücre içinden geçebilir. Elektrik üretimi, hücreler tarafından soğurulan fotonlarla gerçekleştirilmektedir [21]. Kullanılan yarı iletken malzemesine göre soğurulan dalga boyu aralığı da değişebilmektedir. Çoğunlukla Si bazlı hücreler yaygın kullanıldığından, genellikle 400-1150 nm arasındaki fotonlar Si yarı iletken malzemeye çarparak enerjilerini bu malzemelerin atomlarına aktarmaktadır [22]. Bu enerji aktarımı, yarı iletkenlerdeki elektronları uyararak elektronların iletim bandına çıkmasına neden olmaktadır. Bu süreçte, elektronun yükseldiği enerji seviyesinden geriye bir "boşluk" kalmaktadır. Bu hareketle, bir elektron-boşluk çifti meydana gelmektedir [23], [24].

Yarı iletken malzemelerin 5A grubu ve 3A grubu elementlerle katkılandırılması ile n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşmaktadır [25], [26]. Bu bölgeler bir elektrik alan meydana getirmektedir ve bu elektrik alan elektron-boşluk çiftini birbirinden ayırarak farklı

yönlere ilerlemesini sağlamaktadır. Yarı iletkende serbest kalan elektronlar metal kontaklara doğru akmaktadır ve metal iletkenler aracılığı ile toplanan akım dış devreye yönlendirilmektedir [23].

FV paneller, farklı bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Panelin temelinde FV hücreleri bulunmaktadır. Bu hücreler, elektrik üretiminin gerçekleştiği kısımdır ve günümüzde en yaygın olarak Si kullanılmaktadır. Panelin ön ve arka yüzeyleri arasında yapışma sağlanması amacıyla hücreler kapsülleyici polimerik filmler arasına yerleştirilmektedir. Kapsülleyici olarak en yaygın kullanılan Etilen Vinil Asetat (EVA) polimeridir. Panelin ön ve arka levhaları için ise polimer ya da cam kullanılabilir. Arka levha, elektriksel izolasyonu sağlamak ve güneş hücrelerini korumak için kullanılır. Ön levha ise hem koruyucu bir görev görürken hem de güneş ışınlarının hücreye ulaşmasını sağlamaktadır. Oluşan yapıyı bir arada tutmak için ise çerçeve kullanılmaktadır. Genellikle alüminyum çerçeve tercih edilmektedir. Panelin arka kısmında ise bağlantı kutusu bulunmaktadır. Bu kutu elektriksel bağlantıları içermektedir ve panelin arkasına monte edilmektedir [27].



Şekil 1.2: FV panel bileşenleri [27].

1.2. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Standart Testleri

FV panellerin üretim aşamaları esnasında ve yapılarında meydana gelebilecek hataların belirlenmesi, dünya çapında kabul edilen belirli standart testlerin uygulanması ile gerçekleşmektedir. Bu testler, FV sistemlerinin dayanıklılık ve güvenilirliklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Dayanıklılık, bir ürünün veya sistemin önemli bir bozulma olmadan ne kadar süre işlev görebileceğini ifade ederken; güvenilirlik, bir ürünün veya sistemin belirli bir süre boyunca arızasız olarak amacına uygun şekilde ne kadar tutarlı çalıştığını ifade etmektedir. Özetle, dayanıklılık uzun ömürlülükle, güvenilirlik ise tutarlı performansla ilgilidir [28].

FV endüstrisinde kullanılan standartlar iki ana kategoriye ayrılmaktadır: performans ve güvenlik. Performans standardında (IEC 61215) panelin nominal gücü, elektriksel özellikleri, mekanik özellikleri ve çevresel koşulların etkisi gibi farklı özelliklerin değerlendirildiği testler uygulanmaktadır. Bu testler arasında izolasyon direnci, görsel denetim, baypas diyot testi, sıcak nokta, dış mekân maruziyeti, mekanik yük, termal döngü, nemli donma ve nemli-ısı (DH) testleri örnek verilebilir. Panelin güvenli kullanımını sağlamak için tasarlanan güvenlik standardında (IEC 61730) ise panellerin mekanik dayanıklılık, yangına karşı dayanıklılık ve elektriksel dayanıklılık gibi özelliklerinin değerlendirildiği testlerdir. Bu kategoride de sıcaklık testi, panel camının kırılması, ters akım, dielektrik dayanımı, yangın direnci gibi testler bulunmaktadır. Bir FV panelinin kullanılabilir olması için bu standartlardan sertifikasyon almış olması gerekmektedir [29].

Günümüzde, üreticiler tarafından FV panelleri için 25-30 yıl kadar performans garantisi verilmektedir. Bu performans garantisi, panelin verilen kullanım ömrü sonunda en fazla %20 güç kaybını öngörmektedir. Ancak, aşırı sıcak veya soğuk, nemli ya da kurak bölgelerdeki gibi farklı iklim koşullarıyla karşı karşıya kalan ve farklı bileşenlere sahip olan paneller için aynı garantinin söz konusu olması sorun oluşturmaktadır. Bu sebeple, malzeme seçimi ve panel tasarımı, iklim kaynaklı bozulma açısından kilit rol oynamaktadır. FV panellerinde ömür boyu performans sağlanması için kullanılan malzemelerin, bileşenlerin ve sistemlerin degradasyon mekanizmalarının daha iyi anlaşılması gerekmektedir [14].

1.3. Kalifikasyon Testleri

Kalifikasyon testleri, bir güvenilirlik test programı temel alınarak geliştirilmiş belirli kriterlere dayalı hızlandırılmış testlerdir. Bu testler katı bir şekilde uygulanan başarılı/başarısız olarak değerlendirilen ölçütler içermektedir ve ürün güvenilirliğini değerlendirmede kullanılmaktadır. Tasarlanmaları, sahada meydana gelen hata mekanizmalarının tanımlanmasına dayanmaktadır. Belirlenen saha hatalarının ardından, bu hataları kısa sürede çoğaltacak hızlandırılmış testler geliştirilmiştir. **Tablo 1.1**, bu testlerin bazı örneklerini ve hızlandırdıkları hata çeşitlerini içermektedir. Bu liste, IEC 61215'e dönüşen FV paneli kalifikasyon test dizilerinin oluşturulmasında temel alınmıştır [30], [31].

Tablo 1.1: Hızlandırılmış testler ve meydana gelebilecek hata çeşitleri.

Hızlandırılmış Test	Hata çeşidi
Termal döngü	Kırık bağlantı, kırık hücre, lehim bağlantı hataları, bağlantı kutusu yapışması, panel bağlantısı açık devreleri, ark oluşumuna neden olan açık devreler
Nemli ısı	Korozyon, kapsülleyici delaminasyonu, kapsülleyici yapışma ve esneklik kaybı
Nemli donma	Kapsülleyici delaminasyonu
UV test	Kapsülleyici delaminasyonu, kapsülleyici renk değişimi, arka tabakanın bozulması sebebiyle topraklama hatası
Mekanik yük	Bağlantı hataları, yapısal hatalar
Kuru ve ıslak yalıtım	Kapsülleyici malzemenin delaminasyonu
Direnç	Topraklama hataları
Sıcak nokta testi	Sıcak noktalar
Dolu testi	Kırık hücreler ve kırık cam
Baypas diyot termal testi	Baypas diyot hataları

1.4. FV Degradasyonuna Sebep Olan Etkenler

FV paneller, kullanım ömürleri boyunca çeşitli dış ve iç streslere maruz kalmaktadırlar. Dış stresler, hava koşulları, UV ışınları, nem, sıcaklık, kirlilik, doğal ya da endüstriyel kaynaklı kimyasallar gibi dışarıdan gelen etkilere bağlı olarak

oluşabilecek streslerdir. İç stresler ise panel yapısını oluşturan bileşenlerden veya işleme bağlı etkilerden kaynaklanabilmektedir. Bu çevresel etkiler, paneller için oldukça önemlidir. Çünkü uzun süre bu etkilere maruz kalan panelin yapısında belirli bozulmalar meydana gelebilmektedir [3].

FV panellerin UV ışınlarına maruz kalması, uzun vadede çeşitli bozulmalara yol açabilmektedir. UV ışınları, yüksek enerji taşıyan elektromanyetik dalgalar olduğundan, FV panellerinin yüzeyindeki koruyucu tabakaların ve kapsülleyici polimerik malzemelerin kimyasal yapısını değiştirebilmektedir. Bu değişiklikler, panel yüzeyinde sararmaya, çatlaklara ve malzemelerin bozulmasına neden olabilmektedir. UV ışınları, FV panellerinin performansının azalmasına, ömrünün kısılmasına ve enerji üretim verimliliğinin düşmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, UV dayanımı yüksek malzemelerin kullanılması ve koruyucu kaplamaların uygulanması, FV panellerinin ömrünü uzatmak ve performansını korumak için kritik öneme sahiptir [32].

Sıcaklık, özellikle kimyasal reaksiyonlar ve difüzyon ile ilgili olan bozulmaları hızlandırıcı etki yapar ve panel performansını etkileyen etkenlerden biridir. Bu sebeple önemli bir çevresel faktördür. Malzemelerdeki difüzyonu ve reaksiyon oranlarını hızlandırabileceği ve panel parçalarının termal genleşme katsayılarındaki farklılıklar nedeniyle mekanik stresi tetikleyebileceği için oldukça önemlidir [33], [34].

Diğer önemli görülen etkilerden biri nemdir. Nem, güneş panellerinin bileşenleri arasındaki bağları zayıflatarak, katmanların ayrılmasına, performans kaybına ve yansıtıcı kaplamaların zarar görmesine neden olabilmektedir. Bu durum, metalik bileşenlerin korozyon riskini arttırabilir. Dış ortam şartlarında, nem çeşitli biçimlerde karşımıza çıkmaktadır: su buharı, yoğunlaşma, yağmur, kar ve buz. Bu faktörler, güneş panellerinin uzun vadeli dayanıklılığını olumsuz etkileyebilmektedir [35].

Kirlenme de panel performansını etkileyen dış etkenler arasındadır. Çeşitli toz, kir, hava kirliliği, mikrobiyal yosun büyümesi veya kuş pisliği gibi sebeplerden kaynaklanabilmektedir. Kirlenme, güneş panelinin performansını doğrudan etkilemese de ışık geçirgenliğini etkileyerek performansın azalmasına neden olmaktadır [36].

Dış stres faktörlerinin yanında iç stres oluşturan faktörler de paneller için oldukça kritiktir. Bu iç stresleri, panelde tercih edilen malzemeler ya da üretim aşamasında

maruz kaldığı laminasyon gibi işlemler oluşturabilmektedir. Örneğin; dizilim ve laminasyon işlemleri sırasındaki termo-mekanik kuvvetler, güneş hücrelerinde mikro çatlaklara sebep olabilmektedir. Laminasyon sırasında polimerin aşırı termal genişmeye uğraması sonucu güneş hücreleri yerinden oynayabilmektedir. Buna bağlı olarak hücre boşlukları artabilir ve FV şeridi ile lehim bağlantılarına ek stres yüklenebilir. Yaygın görülen başka bir sorun ise EVA polimerinin yeterince çapraz bağ yapmamasıdır. Yetersiz çapraz bağlanma derecesine sahip paneller, işletim koşulları altında tamamen kürlenebilmektedir. Birkaç çalışma, yetersiz çapraz bağlanmış EVA ile üretilen panellerin potansiyel kaynaklı bozulma (PID) ve korozyona karşı daha yüksek duyarlılık gösterdiğini bildirmiştir [37]-[40]. Bunların dışında film kalınlığı, degradasyonu hızlandırıcı yan ürün oluşturabilecek malzemeler, suda çözünürlük gibi fiziksel özellikler de iç stres oluşumu açısından kritiktir [3], [41].

1.5. FV Degradasyon Mekanizmaları

Panelin maruz kaldığı iç ve dış streslerle birlikte yapısında ve bileşenlerinde çeşitli bozulma mekanizmaları meydana gelebilmektedir. Bu durum, güvenlik sorunlarına ve güç kaybı hatalarına neden olabilmektedir. Bunlardan en yaygın olanları renk değişimi/sararma, PID, korozyon, delaminasyon, cam kırılması/çatlaması, salyangoz izleri ve bağlantı kutusu hatalarıdır [42].

PID, Si hücreli panellerde oldukça yaygın görülen elektriksel hatalardan biridir. Yüksek sistem gerilimleri, panelin ön camı ve kapsülleme malzemesi arasından kaçak akımlara neden olmaktadır. Çerçeve ile hücreler arasındaki oluşan elektriksel potansiyel, güç çıkışında zararlı bir etki oluşturmaktadır ve sonucunda güç kaybı meydana gelmektedir. Kullanılan kapsülleyicinin özellikleri, polaritesi, hacim direnci veya su buharı geçirgenlik hızı (WVTR), PID dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir [43].

Renk değişimi, FV panellerde optik özelliklerin bozulması kaynaklı meydana gelen en yaygın kapsülleyici hatalarından biridir. EVA polimeri UV ışınlarına maruz kaldıkça zamanla sararma ya da kahverengileşme gibi renk değişiklikleri gösterebilmektedir. Bu bozulma, güneş hücrelerinin orta kısmından ya da kenar kısmından başlayarak görülebilmektedir. Meydana gelen renk değişimi önemli bir güvenlik sorununa ya da güç düşüşüne sebep olmazken, daha endişe verici bozulmaların habercisi olabilmektedir [44], [45].

FV degradasyon çeşitlerinden bir diğeri metalik bileşenlerin korozyonudur. En yaygın görülen ve gücü etkileyen bozulmalardan biridir. Korozyon meydana gelmesi elektrik bağlantılarındaki ve hücre içinde seri direnci seri direncini arttırarak güç çıkışını azaltabilmektedir. Böylece FV performansında düşüş meydana gelmektedir [14]. Ortamda su buharı bulunması korozyonu hızlandırıcı etki yapmaktadır. Bu sebeple kullanılan kapsülleyici ve arka tabaka malzemelerinin nem geçirgenliği özellikleri ve karakteristik özellikleri uzun süreli dayanıklılık açısından oldukça önemli hale gelmektedir [46], [47].

Cam, kapsülleyici aktif tabakalar ve arka tabakalar arasındaki yapışma, çeşitli sebeplerden dolayı olumsuz etkilenebilmektedir. Genellikle, yapışmanın yetersiz olması, kirlenme, nem, sıcaklık gibi çevresel etkenler nedeniyle delaminasyon meydana gelebilmektedir. Bu durum, nemin girişi ve korozyonun ardından gerçekleşebilmektedir. Arayüzeylerde oluşan delaminasyon, optik yansımaya neden olabilmekte ve sonuç olarak panellerde güç kaybına da yol açabilmektedir [48].

FV panellerinde çeşitli streslerden dolayı panel camının kırılması, hücrelerin çatlaması, çerçevenin kırılması gibi mekanik kaynaklı hatalar da sıklıkla meydana gelebilmektedir. Bu tarz hatalar genellikle vandalizm, termal stres, rüzgar, dolu veya taşıma kaynaklı olabilmektedir [49]. FV hücrelerdeki çatlaklar mikro boyutta ise çıplak gözle görülemezken, makro boyuttaki çatlaklar görülebilmektedir. Belirli bir sayıdaki hücre çatlakları genellikle normal kabul edilmektedir. Üretim süreçlerinde, FV hücrelerin gömülmesi ve dizilmesi gibi adımlarda, paketleme ve taşıma işlemlerinde, montaj sırasında yaşanan düşme veya üzerine basılma gibi durumlarda büyük hasarlar oluşabilmektedir. Bu tür hasarlar, panelin uzun vadeli performansını ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Hücrelerin dikkatlice işlenmesi ve montajı, panelin hasara karşı korunmasında kritik öneme sahiptir [50]-[52].

Karşılaşılan bir diğer hata ise salyangoz izleridir. Salyangoz izleri, güneş hücrelerinde gümüş katkılı iletkenlerin bozulma sonucu renk değişimi nedeniyle oluşan görünür bir kusurdur. Salyangoz izi tipi hata durumunda genellikle güneş hücresinin kenarında ve güneş hücresi çatlakları boyunca gri/siyah renk değişimi meydana gelmektedir. Renk değişimleri çevresel koşullardan etkilenebilmektedir ve panelin performansını etkilemediği bildirilmiştir. Ancak, salyangoz izleri tarafından görselleştirilen hücre çatlakları, ilerleyen zamanlarda FV panelin gücünü azaltabilmektedir [53]-[56].

Diğer yaygın görülen bozulmalardan biri ise bağlantı kutusu hatalarıdır. Bağlantı kutusu, panel hücre dizilerinin dış terminallere bağlantısını koruyan kapalı kutudur [57]. Bu kutu genellikle, kısa devre noktaları veya gölgelenme durumlarında hücreleri korumak için baypas diyotları içermektedir. Bağlantı kutusu alanında gözlemlenen bazı hata durumları arasında, bağlantı kutusunun arka tabakaya yeterince iyi sabitlenmemesi yer almaktadır. Bazı yapıştırma sistemlerinin kısa dönemde etkili olabileceği; ancak, uzun vadeli yapışkanlık sağlamakta yetersiz kalabileceği bir durum olabilmektedir. Bu durumun yanı sıra, kötü imalat süreci sonucunda açık veya düzgün kapatılmamış bağlantı kutuları sıkça karşılaşılan sorunlardan biri olarak görülmektedir. Ayrıca, kutuya nem girişi, bağlantıların oksitlenmesine neden olabilmektedir ve bu durum kutunun fonksiyonelliği azaltabilmektedir. Bununla birlikte, bağlantı kutusu içerisinde kötü kablolama olması durumunda iç ark oluşabilmektedir. Bu tür bir hata yangınla sonuçlanabileceği için son derece tehlikeli görülmektedir [58], [59].

Bu çeşitli degradasyon ve hata durumlarının FV panelin hizmet ömrünü önemli ölçüde etkilediği açıktır. Ancak, bu tür sorunların önlenmesi ve panelin dayanıklılığının artırılması için doğru malzeme seçimi ve üretim süreçleri kritik öneme sahiptir. Panel malzemelerinin seçimi, özellikle kapsülleyici ve arka tabaka malzemelerinin nem geçirgenliği gibi faktörler, uzun vadeli performansı büyük ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, güvenilir bir üretim süreci, panelin çevresel etkilere karşı dayanıklılığını arttırabilmektedir ve potansiyel bozulma ve hataların önüne geçebilmektedir. Bu nedenle, FV panellerin tasarımında ve üretiminde dikkatlice seçilen malzemeler panelin daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olmasını sağlayabilmektedir.

1.6. Yaygın Kullanılan FV Malzemeleri ve Son Teknolojiler

FV panellerin performansı ve dayanıklılığı, kullanılan malzemelerin özellikleri ve üretim süreçleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu kısımda, FV panel bileşenlerinde en yaygın kullanılan malzemelerden bahsedilmektedir.

1.6.1. Güneş Hücreleri

1.6.1.1. Silisyum Bazlı FV Hücreler

Mono-kristalin silisyum (m-Si) hücreler, yüksek saflıkta Si kullanılarak üretilmektedir. Bu hücreler, tek bir kristal yapısına sahip olduğu için elektron hareketi

sırasında daha az engelle karşılaşır ve dolayısıyla daha yüksek verimlilik sunmaktadır. m-Si hücreler, genellikle %24 ile %27 arasında verimlilik sağlamaktadır ve uzun ömürlü olarak bilinmektedir. Ancak, üretim maliyetleri poli-kristalin silisyum (p-Si) hücrelere göre daha yüksektir [13], [60].

p-Si hücreler, birçok Si kristalinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Üretim süreci, m-Si hücrelere göre daha az maliyetlidir ve daha az enerji kullanılarak üretilmektedir. p-Si hücrelerin verimliliği son yıllarda %20 ile %24 arasında değişmektedir [13], [61].

1.6.1.2. İnce Film FV Hücreler

Kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücreleri, düşük maliyetli üretim süreçleri ve enerji geri dönüş sürelerinin kısa olması ile dikkat çekmektedir. CdTe hücrelerin verimliliği son çalışmalarda %22 civarına ulaşmıştır. Kadmiyumun toksik olma potansiyeli ve Tellürün nadir bulunması, bu teknolojiye yönelik bazı çevresel ve ekonomik endişeleri beraberinde getirmektedir [62].

Bakır-İndiyum-Galyum-Selenid (CIGS) bazlı hücreler, Bakır, İndiyum, Galyum ve Selenyum elementlerinden oluşmaktadır. Bu hücreler, yüksek verimlilik ve esnek üretim olanakları sunmaktadır. CIGS hücrelerin laboratuvar ortamındaki verimliliği %23'lere kadar çıkabilmektedir. Ancak, geniş çaplı üretim ve maliyet etkinliği açısından bazı zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır [13], [62].

1.6.1.3. Gelişmekte Olan Teknolojiler

Perovskit güneş hücreleri, özellikle son yıllarda büyük bir ilgi görmektedir. Bu hücreler, yüksek verimlilik, düşük üretim maliyetleri ve esnek yapıda olmaları ile dikkat çekmektedir. Perovskit hücrelerin verimliliği hızla artmakta olup, laboratuvar ortamında %26'lara ulaşmıştır. Ancak, ticari üretim ve uzun ömürlülük konularında karşılaşılan kararsızlık problemleri sebebiyle araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [13], [63].

Organik FV hücreler, organik yarı iletken malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Bu hücreler, yapısal esneklik ve düşük maliyet avantajları sunmaktadır. Organik FV hücrelerin verimliliği genellikle %17-19 civarındadır ve büyük ölçekte üretim için uygun maliyetli yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir [63].

Bakır-Çinko-Kalay-Kükürt-Selenyum (CZTSSe) bazlı hücrelerin son yıllarda verimleri %15'lere ulaşmıştır.

Bunlar dışında boya duyarlı hücreler ve kuantum nokta hücreleri de yeni teknolojiler arasındadır. Kuantum nokta hücreleri yapılan son çalışmalarda %19 civarında verimlilikleri görmüştür. Boya duyarlı hücreler ise %13 verimliliğe ulaşmışlardır [13].

1.6.2. Ön/Arka Levhalar

Levha seçiminde dikkat edilmesi gereken temel hususlar arasında darbe dayanımı, dış etkenlere (UV ışınları, nem, sıcaklık gibi) karşı dayanıklılık, sadece ön levha için geçerli bir kriter olan ışık geçirgenliği gibi faktörler yer almaktadır. Ön/arka levhalar genellikle cam/polimer (CP) veya cam/cam (CC) malzemelerden seçilmektedir [64].

Cam: Cam, güneş paneli ön levhası için en yaygın kullanılan malzemedir. Çift camlı güneş panellerinde ise arka levha olarak da kullanılmaktadır. Bu tür paneller, arka yüzeylerinden de ışık alarak enerji üretmektedir. Cam olarak genellikle temperli cam kullanılmaktadır, çünkü bu cam türü yüksek mekanik dayanıklılık ve hava koşullarına karşı direnç sağlamaktadır. Temperli camın yüksek ışık geçirgenliği, daha fazla ışığın güneş hücrelerine ulaşmasını sağlamakta ve böylece panel verimliliğini arttırmaktadır. Levha olarak cam kullanılması UV ışınlarına karşı koruma sağlamaktadır ve yangına dayanıklıdır. Ayrıca cam, nemin hücre ortamına sızmasını önlediği ve nemin neden olduğu bozulmayı en aza indirdiği için avantajlı olarak görülmektedir [65].

Plastik (ETFE, PET, PVF): Plastik malzemeler, özellikle esnek ve hafif panellerde kullanılmaktadır. ETFE (Etilen Tetrafloroetilen) ve PET (Polietilen Tereftalat) gibi malzemeler, daha hafif olmaları ve esneklik sağlamaları nedeniyle taşınabilir ve bükülebilir güneş panellerinde tercih edilmektedir. Ancak, plastik malzemeler cam kadar dayanıklı değildir ve uzun süreli UV maruziyetine karşı daha az dirençlidir. Arka levhalar genellikle çok katmanlı filmlerden oluşmaktadır. PVF (Polivinil Florit) ve PET, arka levha için en sık kullanılan malzemelerdendir. Bu malzemeler, neme ve çevresel etkilere karşı iyi bir bariyer sağlamaktadır. PVF, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve uzun ömürlülüğü ile bilinmektedir [66].

1.6.3. Kapsülleyici Polimerler

Kapsülleyici polimerler, güneş hücreleri için ön ve arka yüzey arasında yapışma, mekanik stabilite, elektriksel yalıtım ve çevresel faktörlere karşı koruma gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Doğru kapsülleyici seçimi, FV panellerinin uzun vadeli performansını ve dayanıklılığını arttırmada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle

kapsülleyicilerin nem geçirgenliği, sararmaya karşı direnci ve mekanik dayanıklılığı, panelin ömrünü etkilemektedir. Ayrıca, güvenilir bir üretim süreci, panelin çevresel etkilere karşı dayanıklılığını arttırabilmekte ve potansiyel bozulma ve hataların önüne geçebilmektedir. Kullanılan en yaygın kapsülleyici, elastomer sınıfında kategorize edilen EVA'dır [67], [68].

EVA, kovalent bağlar yoluyla kimyasal çapraz bağlantılar oluşturmaktadır ve vinil asetat grubunun varlığı nedeniyle hidrofilik özellik sergilemektedir. Asetil grupları, hidrojen bağı oluşumu yoluyla hidroliz reaksiyonlarına daha yatkındır. EVA, UV emiciler, stabilizatörler ve antioksidanlar gibi katkı maddeleriyle iyi uyumluluk göstermesi ve uygun maliyetli olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, kolay hücre kapsüllemesi ve rastgele radikal çapraz bağlanması da EVA'nın avantajlı özellikleri arasında bulunmaktadır. Bunun yanında, foto-termal degradasyon yoluyla bozulmaya uğraması ve neme maruz kaldığında yapısında hidroliz reaksiyonları meydana gelmesi EVA için dezavantajlı durumlardandır. Hidroliz, hücre metalizasyonunu aşındıran, delaminasyon sorunlarına ve panel performansının düşmesine yol açan asetik asit oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Asetik asidin uçucu özelliğine rağmen panel içinde birikmesi, hücre metalizasyon korozyonunu ve PID'yi hızlandırıcı etki yapmaktadır [69], [70]. Bu sebeple, bozulmayı hızlandırıcı etkiyi önlemek için mevcut araştırmalar asetik asit içermeyen alternatif kapsülleyici malzemelere odaklanmaktadır. Poliolefin Elastomer (POE), Termoplastik Poliolefin (TPO) ve İyonomerler (ION), dış etkenlere karşı stabilite sağlamaları ve bileşimlerinde asetik asit bulundurmamaları nedeniyle umut verici seçenekler olarak ortaya çıkmışlardır [71].

İyonomerler, polimer omurgasına kovalent olarak bağlanmış iyonik gruplar içeren polimerlerdir. Bu iyonik gruplar, polimer matrisinde tuz köprüleri oluşturarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Kimyasal çapraz bağ içermezler. Yapısal olarak, etilen ve doymamış karboksilik asit kopolimerine dayanmaktadır ve termoplastik sınıfına aittirler. Tipik olarak Çinko veya Sodyum iyonları içeren bu ürünler oldukça iyi UV direnci sergilemektedir. Bu özellikleri, iyonomerlerin darbelere ve mekanik strese karşı yüksek dayanıklılık göstermesini sağlamaktadır. FV paneller için önemli bir özellik olan ışık geçirgenliği, iyonomerlerde oldukça yüksektir. İyonomerlerin su emme kapasiteleri düşüktür, bu da uzun ömürlü FV paneller için kritik bir faktördür [72], [73].

POE'nin incelendiğinde termoplastik elastomer sınıfına ait etilen ve alfa-olefin (örneğin, bütün veya okten) kopolimeri yapısında olduğu görülmektedir. Bu polimerler, zincir yapısındaki esneklik ve düşük kristallenme oranı sayesinde elastik ve dayanıklı bir yapı sergilemektedirler. Yapılarında kimyasal çapraz bağlar bulunur ve güneşe maruz kaldığında renk değiştirmedikleri bilinen UV direncine sahip polimerlerdir. Düşük nem geçirgenliği ve yüksek hacim direnci sayesinde, bu polimerler doğal anti-PID özelliği ve uzun süreli dayanıklılık göstermektedirler. Ancak, cam ve gömülü hücreler arasındaki yapışmanın iyileştirilmesi için ek işlemler gerekebilir. Üretim maliyetleri ise karşılanabilir olarak görülmektedir [74], [75].

Termoplastik sınıftan olan TPO polimerleri, genellikle kimyasal çapraz bağ yerine iyon bağları, hidrojen bağları veya kristalitler yoluyla termo-tersinir fiziksel çapraz bağ yapmaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde uzun süren laminasyon işlemleri gerektirmemektedirler. Etilen alfa-olefin kopolimer yapısına (tipik olarak etilen-propilen kauçuk ve etilen-okten kauçuk) dayalı olup, yüksek mekanik performans ve UV direnci göstermektedirler. Ayrıca WVTR değerleri oldukça düşüktür ve yüksek hacim direncine sahiptirler. Sentez ve üretim süreçleri diğer polimerlere göre daha uygun maliyetlidir [74], [76]-[78].

1.7. Literatür Taraması, Tezin Amacı ve Katkısı

Literatürde FV panellerinin uzun vadeli performansını arttırmaya yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle FV panellerinin degradasyon mekanizmaları, panel dayanıklılığının artırılması, panel performansındaki düşüş ve alternatif kapsülleyici malzemeler üzerine dayanmaktadır.

Kaaya ve diğerleri [79] yaptıkları çalışmada, FV panellerin dış dünyada kullanılırken maruz kaldığı etkenler sonucu yaşadıkları performans kaybını ve meydana gelen bozulma mekanizmalarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, hidroliz, foto-degradasyon ve termo-mekanik degradasyon olacak şekilde üç ana degradasyon reaksiyonunu içeren bir model geliştirmişlerdir. Bu modeli ilk olarak laboratuvar testlerinde doğrulamış ve ardından dış dünyadaki test verileriyle kalibre edilmiştir. Bu model kullanılarak, Gran Canaria (deniz kıyısı), Negev (kurak) ve Zugspitze (dağlık bölge) gibi farklı iklimlerde kurulu panellerin yıllık degradasyon oranları ve %20 performans kaybı tahmin edilmiştir. Araştırma sonuçları, kurak bölgenin deniz kıyısı ve dağlık bölgelere kıyasla daha yüksek degradasyon oranına sahip olduğunu göstermiştir.

Koehl ve diğerleri [80], FV panellerin ana bozulma faktörleri olarak sıcaklık ve nem streslerini değerlendirmişlerdir. Bu streslerin polimerik bileşenlerin hidrolizine ve dolayısı ile metalik bileşenlerin korozyonuna neden olduğunu belirlemişlerdir. Kristal Si hücreli ticari boyutlarda üretilmiş FV paneller, laboratuvarında hızlandırılmış nemli-ısı (DH) testine tabi tutulmuştur. Test sıcaklıkları 75, 85 ve 90 °C olarak belirlenmiştir. Testler, nihai bir bozulma durumu elde edilene kadar (3500–7000 saat) sürdürülmüştür. Bozulma fonksiyonu, Boltzmann büyüme fonksiyonu ile modellenmiş ve bu da hata süresinin (t_f) belirlenmesine olanak sağlamıştır. Hata süresi ile test sıcaklığı arasındaki ilişki, bozulma sürecinin aktivasyon enerjisinin değerlendirilmesini sağlayan Arrhenius ilişkisine dayanmaktadır. Elektrolüminesans görüntüleri, bozulma davranışını ve paneller arasındaki farkları göstererek, farklı sıcaklıklar için bozulma mekanizmalarında herhangi bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Nem etkisi açısından, hızlandırılmış hizmet ömrü testi için dış ortam çalışma koşullarının değerlendirilmesine yönelik bir prosedür önerilmiştir.

Adothu ve diğerleri [81], TPO ve EVA gibi FV panel kapsülleyicilerinin degradasyon davranışını ve degradasyona sebep olan faktörleri anlamak için bir araştırma gerçekleştirmiştir. Özellikle, uzun süreli DH yaşlandırma testi koşullarında TPO'nun performansını incelemişlerdir ve EVA ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre; TPO'nun, EVA'ya kıyasla optiksel geçirgenlik kaybı ve sarılık indeksi değerlerinin artış hızının dört kat daha düşük olduğu bulunmuştur. DH testinin neden olduğu degradasyon mekanizması ve bileşenleri, Raman ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Raman spektrumu, iki polimer için de kenar kısımlardaki karbonil grubu kayıp hızının merkezden bir derece daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. FTIR, EVA'da asetik asit ve hidroksil grubu oluşumunun TPO'ya kıyasla daha yüksek bir hızda olduğunu göstermiştir. FTIR ayrıca, TPO'nun polar olmayan doğası nedeniyle daha düşük su emilimi olduğunu, EVA'nın ise polar doğası nedeniyle daha fazla su emilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. TPO ve EVA kapsülleyicilerinin termal özellikleri değişim hızı, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılarak -80 °C'den 280 °C'ye ısı çevrim uygulanarak incelenmiştir. DH testi sırasında, EVA kapsülleyicisinin kristalizasyon derecesindeki artış hızının, TPO kapsülleyicisine kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Dintcheva ve diğerlerinin [82] yaptığı çalışma, FV panel üretiminde önemli bir rol oynayan kapsülleyici malzemelerin ve teknolojilerinin derlendiği bir çalışmadır. Bu

Çalışma, son yirmi yılda enerjiye olan ihtiyaın ve artan talebin, FV panellerin üretiminde önemli gelişmelere yol açtığını belirtmektedir. Panel tasarım sürecinde kritik bir konu, hücre gömülmesi için uygun kapsülleyici malzemelerin ve teknolojilerin benimsenmesidir. Benimsenen kapslleyiciler, panel verimliliği, istikrarı ve güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Ayrıca, FV panellerinin performansının zaman içinde değişmeden kalması için, kapsülleyici malzemelerin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Kapsülleyici malzemelerin seçiminde, malzemelerin rtimi ve hücre gmlme teknolojileriyle ilişkili maliyet ve performansı arasında iyi bir denge sağlanmalıdır. Bununla birlikte, kapslleyiciler, FV hücrelerini nem, oksijen ve panelin işlevine zarar verebilecek faktörlerden koruyarak, aktif FV unsurlarını çevreden izole etmelidir. Bu derleme, farklı kapsülleyici malzemelerin, FV rtimi için benimsenmelerinin avantajlarına ve dezavantajlarına, hücre gömme işlemi için kullanılan kapsülleyici teknolojilerine, katkı maddelerine ve bu malzemelerin diğer FV bileşenleriyle etkileşimine genel bir bakış sunmaktadır.

Barretta ve diğerleri [83], FV uygulamalar için iki yeni geliştirilmiş kapsülleyicinin (TPO ve POE), iki farklı yaşlandırma testi altında incelenerek EVA ile karşılaştırılması üzerinde çalışmışlardır. Polimerlerin katkı maddesi kompozisyonu, optik ve termal özellikleri ve kimyasal yapısı hakkında bilgiler edinilmiştir. TPO için UV testinden sonra önemli foto-oksidasyon belirtileri tespit edilebilirken, malzemenin stabilizatrlerinde azalma gözlemlenmiştir. EVA ve POE için ise, uygulanan UV dozu $200 \text{ kW} \cdot \text{sa} \cdot \text{m}^{-2}$ 'ye eşit olduğunda degradasyon belirtileri tespit edilmiştir. Termogravimetrik ölçümlerden oksidasyon indüksiyon süresi/dozuna dair bilgilerin türetilmesi için yeni bir yaklaşım sunulmuş ve bu sonuçlar oksidasyon indisleri kullanılarak elde edilen sonuçlarla ilişkilendirilmiştir.

Oreski ve diğerlerinin [74] çalışmasında, son dönemde poliolefinlere dayalı çeşitli yeni nesil kapsülleyici filmler incelenmektedir. Bu yeni nesil malzemeler, polietilen tabanlı farklı yan gruplara sahip olan POE ve TPO polimerleridir. Bu malzemelerin başlıca avantajı, mevcut kapsülleyici olan EVA'nın bozulması sonucu ortaya çıkan asetik asit oluşumunun bu polimerlerde gzlemlenmemesidir. Bu çalışmanın temel amacı, gelecek nesil kapsülleyici filmlerinin malzeme özelliklerini araştırmak ve bunları bir EVA referansıyla karşılaştırmaktır. TPO ve POE kapslleyicileri ile üretilen panellerin elektriksel performansının yanı sıra kullanılan filmlerin malzeme özellikleri de araştırılmıştır. Farklı filmler, UV geçirgenliği ve erime sıcaklıklarında hafif farklara

sahip olsa da karşılaştırılabilir optik, termal ve termo-mekanik özellikler göstermektedir. Sadece TPO için kayma viskozite değerleri, POE ve EVA'dan daha yüksek bulunmuş, bu da FV panel laminasyon parametrelerinin uyarlanmasını gerektirmiştir. TPO ve POE kapsülleyici filmleriyle üretilen panellerde, üretim sonrası elektriksel performans açısından küçük farklar olsa da anlamlı bir güç kaybı gözlemlenmemiştir. Ancak, EVA ile yapılan panellerde, 3000 saatlik DH testine maruz kalma sonrasında, gümüş ızgara ve bağlantıların üzerinde korozyon başlangıcı görülmüştür. Sonuçlara dayanarak, yeni poliolefin kapsülleyici malzemelerinin EVA için geçerli bir alternatif olma potansiyeline sahip olduğu söylenebilmektedir.

Baiamonte ve diğerlerinin [84] çalışmasında, FV panel üretiminde kritik bir rol oynayan kapsülleyici malzemelerin, özellikle EVA ve POE bazlı kapsülleyicilerin, foto-oksidasyon ve termo-oksidasyon direnci açısından performans ve dayanıklılığının karakterizasyonu hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, endüstriyel laminasyon işlem koşullarını simüle etmek için hem EVA ve hem POE levhaları uzun süreli termal işleme tabi tutulmuştur. DSC, reolojik ve mekanik analiz, FTIR ve UV-görünür spektroskopisi gibi analiz teknikleri kullanılarak, laminasyon öncesi ve sonrası EVA ve POE'nin özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem EVA ve hem POE tabakalarının laminasyon işleminin etkisiyle üç boyutlu yapılarının iyileştiğini ve POE'nin gelişmiş mukavemet ve uygun süneklik gösterdiğini göstermektedir. Son olarak, her iki malzemenin de FV paneller için uygun olduğu; ancak, POE'nin oksidasyona karşı daha iyi bir direnç gösterdiği vurgulanmıştır.

Bai ve diğerleri [85] yaptıkları çalışmada, EVA, POE ve TPO kullanılarak üretilen Si hetero-eklem güneş panellerinin DH testi sonrasında performans düşüşlerini incelemeyi amaçlamışlardır. TPO, yalnızca $3.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{gün}^{-1}$ olan en düşük WVTR değerine sahip olup; bu, EVA'dan yaklaşık yedi kat daha düşüktür. EVA'nın FTIR spektroskopisi, DH stresi altında asetik asit oluşumunu ortaya koyan karbonil grubu kaybını göstermektedir. Bu durum, POE ve TPO filmlerinde gözlemlenmemektedir. Her iki panel de kapsülleyici malzemenin DH bozulması üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Cam/TPO/Cam panelinin maksimum çıkış gücü (P_{MP}), 1000 saat DH stresinden sonra başlangıç değerinin %96.6'sını korumaktadır. Kenar sızdırmazlık bandı (SB) kullanılması ile birlikte, düşük WVTR değerine sahip filmlerle kapsüllenmiş ticari boyutlu paneller mükemmel DH güvenilirliği göstermiştir ve P_{MP} 'nin 3000 saat DH stresinden sonra %4.8'den daha az düştüğü görülmüştür.

Fiandra ve diğerleri [86] çalışmalarında, FV panellerin kapsüllemesinde kullanılabilecek EVA, TPO ve POE gibi farklı polimerik malzemelerde UV yaşlanmasının neden olduğu kimyasal ve fiziksel özelliklerdeki değişimleri araştırmayı hedeflemiştir. Her bir malzeme sınıfından, farklı kimyasal formülasyonlara sahip, ticari olarak temin edilebilen kapsülleyici filmler analiz edilmiştir. Bu filmlere, UV yaşlandırma testi uygulanmıştır. Test öncesi ve sonrası olacak şekilde malzemelerin özelliklerindeki değişiklikler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, kapsülleme malzemesinin bozulmasının, panel performansındaki azalmaya olan etkilerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır ve daha dayanıklı FV panellerin üretimi için kapsülleyici filmlerin seçimi konusunda kritik bilgiler içermektedir.

Tiefenthaler ve diğerleri [87] yaptıkları çalışmada, FV panellerin uzun vadeli güvenilirliğini etkileyen kapsülleyici malzemelerine odaklanmıştır. Yaygın olarak kullanılan EVA, çevresel etkiyle oluşan deasetilasyon gibi bozulmalara eğilim göstermektedir. Ayrıca, EVA'nın polaritesi, FV panellerin potansiyel kaynaklı bozunumu ile ilişkilendirilen katyon göçüne olanak tanımaktadır. Daha az polariteye sahip olan kapsülleyiciler, daha iyi su ve iyon bariyer özelliklerine izin vermektedir. Bu nedenle, POE, EVA'ya alternatif olarak umut vadeden bir seçenek olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada, EVA ve POE içeren cam-cam panellerine yaşlandırma testleri gerçekleştirilmiş ve bu paneller DH testine maruz bırakılmıştır. Paneller, mikroskopik yöntemler, statik yük altında kayma dayanım testi ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile karakterize edilmiştir. Her iki polimer türünde de 10.000 saatlik DH maruziyetinden sonra belirgin bir bulanıklık ortaya çıkmıştır. Bu bulanıklık, şeffaflığın azalması ve ışığın düzensiz dağılması sonucu oluşmaktadır. Bulanıklıktaki değişiklik, cam/EVA/cam numunesinin su alımına atfedilirken, cam/POE/cam arayüzündeki yaşlanma, saçılma bölgeleri olarak görev yapan kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat kristallerinin oluşumuna yol açmıştır. Yaşlandırma sonrasında EVA numunelerinin kayma mukavemetinde belirgin bir değişiklik tespit edilmemiştir. Buna karşılık, yaşlandırma sonrasında POE numuneleri, %80 oranında daha yüksek bir kayma mukavemeti göstermiştir. XPS ölçümleri, POE'nin mükemmel iyon bariyer özelliklerini doğrulamıştır. POE kaplamaların içinde Na^+ ve Ca^{2+} iyonu tespit edilemezken, cam alt tabakalar içinde kırılan POE kaplamalarının kırık yüzeylerinde bu elementlerin önemli bir artışı bulunmuştur.

Peike ve diğerleri [71] piyasada bulunan FV panel kapsülleyici malzemelerinin genel gereksinimlerini ve bu malzemelerin diğer panel bileşenleri ile etkileşimlerini incelemektedir. İncelenen malzemeler arasında EVA, TPO ve iyonomerler de bulunmaktadır. Bu çalışma, bahsedilen kapsülleyici malzemelerinin piyasa durumu, yapıları, özellikleri ve stabilite durumlarının incelendiği bir perspektif sunmaktadır.

Kumar ve diğerlerinin [88] çalışmasında, POE ve EVA filmleri ile hazırlanmış CC, CP ve cam/şeffaf-polimer yapılarına sahip paneller, genişletilmiş UV, DH ve termal döngü testlerine tabi tutulmuştur. CC panellerinde kahverengileşmenin CP panelleriyle kıyaslandığında biraz daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Stres sonrası akım-gerilim (I-V) sonuçları, cam/EVA panellerinin genel olarak cam/POE panellerinden daha düşük performans gösterme eğiliminde olduğunu göstermiştir.

Cattaneo ve diğerleri çalışmasında [89], EVA, ION, POE ve TPO'dan oluşan ticari kapsülleyicilerin, yeni panel tasarımlarına uyumluluğunu değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Hetero-eklem teknolojisine dayalı çift yüzeyli CC yapıda FV paneller kullanılmıştır. Her kapsülleyicinin dayanıklılığı ve hücreler arası etkileşimleri test edilmiştir. Araştırmada, POE kapsülleyici kullanılan panellerin diğer ticari kapsülleyicilere kıyasla hetero-eklem teknolojisine daha uyumlu olduğu bulunmuştur.

Literatürdeki yeni kapsülleyici teknolojileri ile ilgili çalışmalar burada bahsedilenlerle sınırlı değildir. Bu çalışmaların genel olarak odak noktası, panelleri degradasyona uğratan etkenlerin etkilerini en aza indirerek daha dayanıklı FV paneller üretmektir. En yaygın kullanılan kapsülleyici malzemenin EVA olduğu bilinmektedir. Çalışmalar, EVA'dan daha yüksek performansa sahip alternatif malzemelere odaklanmaktadır.

Bu tezin temel amacı, panellerde en yaygın kullanılan EVA filmi yerine kullanılabilecek alternatif (ION, POE, TPO) filmler ile hazırlanmış panellerde nemli ısı testi altında meydana gelen performans kayıplarının analizi ve degradasyon kinetiklerinin modellemesidir. Modelleme, temel olarak yeni bir yaklaşım olan deneysel kinetik modele dayanmaktadır ve Boltzmann büyüme fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçların doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bozulmanın altında yatan mekanizmaları anlamak için Ağ Yapısal Eşitlik Modeli (netSEM) kullanılmıştır. Ardından, nemin farklı kapsülleyici malzemeler ile hazırlanmış panellerin performansı üzerine etkileri ve panel içerisine nem girişini engellemek için kullanılan kenar sızdırmazlık bandının katkısı incelenmiştir.

2. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, FV panellerin üretim süreci, test ve karakterizasyon aşamaları ve degradasyon kinetiğinin modelleme yöntemleri hakkında bilgi sağlanacaktır.

2.1. FV Panellerin Üretim İşlemleri

Bu çalışmada, CC konfigürasyonuna sahip, kapsülleyici olarak EVA, ION, POE ve TPO filmleri ile üretilmiş Si bazlı hücrelerden oluşan paneller kullanılmaktadır. Her bir panelin Poliizobütilen (PIB) bazlı kenar sızdırmazlık bandı (SB) içeren ve içermeyen olacak şekilde iki konfigürasyonu mevcuttur.

Her bir panel, **Tablo 2.1**'de verilen koşullar doğrultusunda laminasyon işlemi uygulanarak üretilmiştir. Ardından, panellere 5000 saat boyunca DH testi uygulanmış ve I-V ölçümleri alınarak elektriksel parametreleri elde edilmiştir.

Tablo 2.1: Panellere uygulanan laminasyon koşulları.

Panel	Sıcaklık (°C)	Vakum Süresi (dak)	Basınç (mbar)	Laminasyon Süresi (dak)
EVA	150	5	900	10
ION	170	5	900	10
POE	150	5	900	10
TPO	150	5	900	10

2.1.1. DH Testi ve I-V Ölçümleri Alınması

FV sektörü her geçen yıl büyüdüğünden dolayı şebeke yoluyla kullanılan elektrik ile rekabet edebilmesi için FV maliyetlerinin düşürülmesi önemli görülmektedir. FV sektöründeki maliyetin düşürülmesi, panel tasarımında, malzemesinde ve üretiminde değişiklikler meydana gelebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca panel maliyeti düşürülürken FV güvenilirliğinin ve dayanıklılığının da olumsuz etkilenmemesi gerekmektedir. Panellerin güvenilirliklerinde bir sorun olmadığından emin olmak için dış dünyada test etmek en garanti yol gibi düşünülebilmektedir. Ancak, dış dünyada gözlem yapmak uzun süreler gerektirdiği için zaman ve maliyet açısından dezavantajlıdır. Bu noktada, hızlandırılmış testler uygulanmaktadır. Bu testler ile panelde meydana gelebilecek olası bozulmaları değerlendirmek mümkün olmaktadır.

2.1.1.1. DH Testi

DH testi, FV endüstrisinde panellerin dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılan IEC 61215 standardında yer alan en zorlayıcı testlerden biridir. Test sırasında kullanılan koşullar, 85°C sıcaklık ve %85 bağıl nem (RH) oranıdır. Bu koşullar, panellerin yaşlanma sürecini hızlandırabilen yüksek sıcaklık ve nem seviyelerini temsil etmektedir; ancak, dış dünya ortamlarında sıkça karşılaşılmayan koşullardır. Dolayısıyla, bu test sonuçlarının, panellerin dış dünya koşullarında nasıl bir performans sergileyeceğini tam olarak yansıtmayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, bu testin daha yüksek sıcaklıklara veya uzun sürelerle genişletilmesi, ilgili bozulma mekanizmalarının doğru bir şekilde gözlemlendiğinden emin olmak için dikkatle yapılmalıdır [90].

Test sırasında paneller, sıcaklık ve nem seviyelerini hassas bir şekilde kontrol edebilen bölmelere yerleştirilmektedir. Daha sonra paneller, standart test şartları kapsamında 1000 saat boyunca bu koşullara maruz bırakılmaktadır ve test süresi boyunca performansları ve bozulmaları izlenmektedir. Test, uzun süre yüksek sıcaklık ve nem koşullarına maruz kalmanın sonucunda meydana gelebilecek delaminasyon, korozyon veya elektriksel hatalar gibi potansiyel sorunları belirlemeyi amaçlamaktadır. DH testi, FV panellerin kalifikasyon sürecinin önemli bir parçasıdır; çünkü, üreticilerin ürün güvenilirliklerini değerlendirmelerine ve endüstri standartlarını karşılamalarına yardımcı olmaktadır [91].

Bu çalışma kapsamında, paneller, standardın belirttiği DH koşullarında, 5000 saat boyunca DH testine maruz bırakılmıştır. Her panelin belirli saat aralıklarında yedi adet I-V ölçümü alınmıştır: 96, 1200, 2200, 2500, 3000, 4000 ve 5000.

2.1.1.2. I-V Ölçümleri

I-V ölçümleri, FV panellerin performansını değerlendirmek için temel bir yöntem olarak görülmektedir ve panelin güç çıkışını, verimliliğini ve elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. I-V ölçümleri, panelin çeşitli güç çıkışlarını farklı gerilim ve akım seviyelerinde ölçerek panelin güç üretim kapasitesini değerlendirmektedir. I-V eğrisi, panelin açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akımı (I_{SC}), maksimum güç noktası (MPP) gibi önemli elektriksel parametrelerin tespit edildiği eğridir ve panelin güç çıkışlarını kapsamlı bir şekilde analiz etmeye yardımcı olmaktadır. FV hücrelerin elektriksel parametreleri, üretim süreçlerinden etkilenebildiği için aynı tür hücrelerde bile farklılık gösterebilir. Hücre

bağlantılarından kaynaklanan kayıplar da göz önüne alındığında, iki özdeş panel bulmak zordur. Bu nedenle, bir FV panelin elektriksel parametrelerini kesin bir şekilde belirlemek için en güvenilir yöntem deneysel olarak ölçülen I-V eğrisidir. Bu ölçüm, FV sistemlerin tasarımı, kurulumu ve bakımı için kritik öneme sahip bilgiler sunmaktadır [92].

I-V ölçümleri, genellikle STC altında ve gerçek işletme koşullarında gerçekleştirilebilmektedir. STC altında panelin akım ve gerilimi, standart ışık yoğunluğu (1000 W/m^2), standart hava kütlesi spektrumu (AM 1.5) ve belirli bir sıcaklık (25°C) altında ölçülmektedir. Gerçek işletme koşullarında ise panelin gerçek güneş ışığı, sıcaklık ve diğer çevresel faktörler altında performansı değerlendirilmektedir [93]. I-V ölçümleri, genellikle I-V test cihazları ve güneş simülatörleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu cihazlar, panelin güç çıkışını farklı gerilim ve akım seviyelerinde ölçmek için kullanılmaktadır. I-V ölçümleri, panelin performansını izlemek, kalibrasyon yapmak ve olası hataları belirlemek için düzenli olarak yapılmalıdır. Bu ölçümler, panelin güvenilirliğini sağlamak ve FV sistemlerinin performansını korumak için önemli bir rol oynamaktadır.

2.1.1.3. I-V Eğrisi

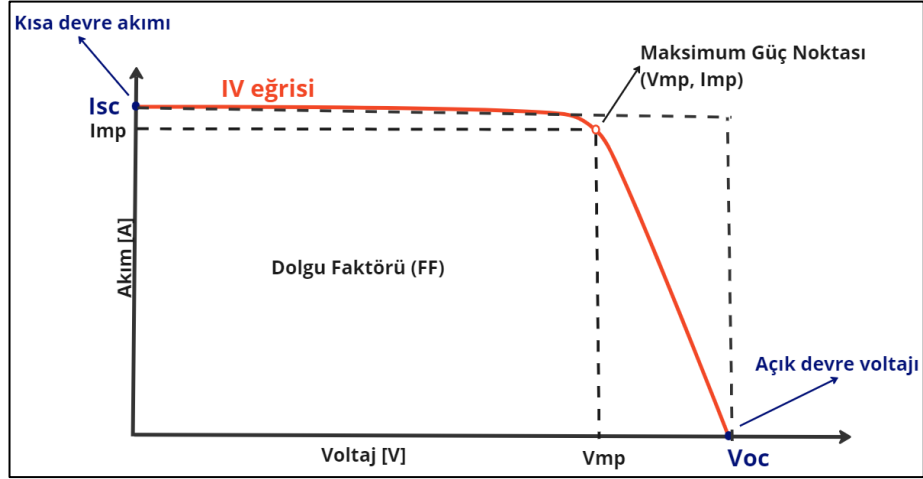
Bir güneş hücresinin veya panelin performansını analiz etmekte en önemli unsurlardan ikisi, **Şekil 2.1** ve **Şekil 2.2**' de görülen I-V ve P-V karakteristik eğrileridir. I-V eğrisi, iki kritik noktayı içermektedir: sıfır gerilimde maksimum akım olan kısa devre akımı (I_{SC}) ve sıfır akımda maksimum gerilim olan açık devre gerilimi (V_{OC}). I-V eğrisindeki her bir nokta için, akım ve gerilimin çarpımı, o çalışma koşulundaki güç çıkışını temsil etmektedir. Hücre tarafından üretilen MPP, karakteristik eğri üzerinde I ve V çarpımının maksimum olduğu bir noktada elde edilmektedir. Dolgu faktörü (FF), P_{MP} ile I_{SC} ve V_{OC} çarpımının oranı olarak tanımlanmaktadır ve eğrinin karesellini ifade etmektedir. P_{MP} ve FF sırasıyla denklem (2.1) ve denklem (2.2)'de verilmiştir [94].

$$P_{MP} = I_{MP} \times V_{MP} \quad (2.1)$$

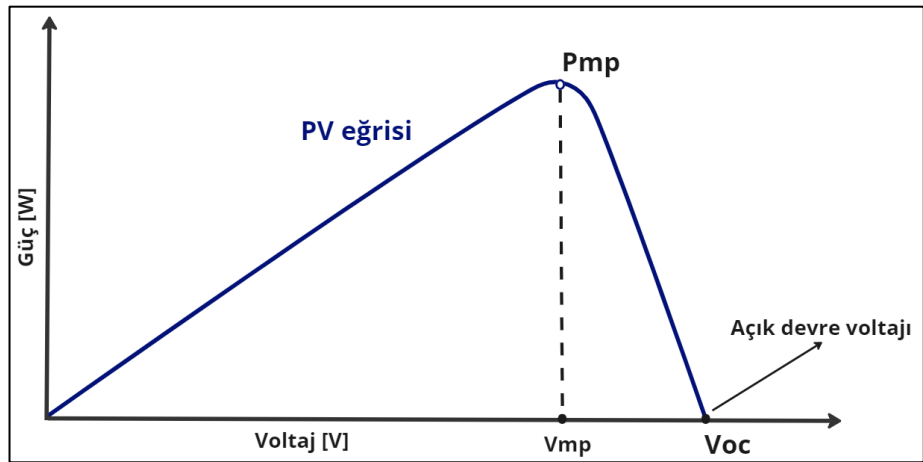
$$FF = \frac{I_{MP} \times V_{MP}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (2.2)$$

İdeal varsayılan bir FV hücrede FF bire eşittir. Bu durumda FF değerinin bire yakın olması istenilen bir durumdur. Bir FV panelin akım ve gerilimlerini tanımlayan denklemler kapsamlı bir şekilde literatürde yer almaktadır [94]-[96]. I-V karakteristik eğrisi, panel terminallerine değişken bir yük bağlanarak akımın sıfırdan kısa devre akımına kadar uygulanması ile elde edilmektedir [97].

Bu çalışmada, panellerdeki akım ve gerilim arasındaki karakteristik ilişkiyi incelemek ve DH testi sırasında panellerin elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişimleri tespit etmek ve performansını değerlendirmek için I-V ölçümleri gerçekleştirilmiş ve I-V eğrileri elde edilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak panellerin performansının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve meydana gelen degradasyon mekanizmalarının tanımlanmasına olanak sağlanmıştır.



Şekil 2.1: I-V Eğrisi.

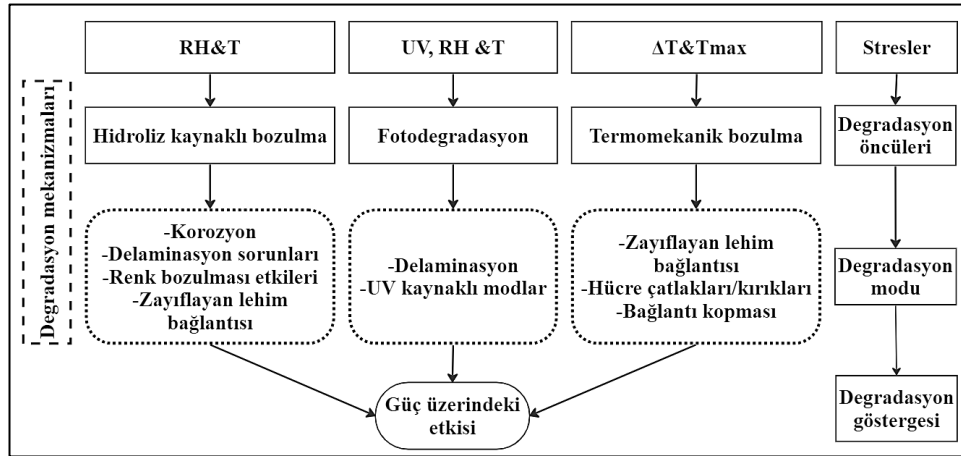


Şekil 2.2: P-V Eğrisi.

2.2. Modelleme Metotları

FV paneller açık havada kullanılan cihazlardır. Açık hava koşullarının standart test koşullarına kıyasla kontrol edilmeyen bir yapıya sahip olması ve bununla beraber panellerin birçok strese aynı anda maruz kalmaları modellenmelerini zorlaştırmaktadır. Bu koşullarda geliştirilen bir modelin çok sayıda bilinmeyenenden oluşması gerekmektedir. Bu sorunu çözmek için değerlendirilmesi gereken bilinmeyen sayısını en aza indirecek bir yaklaşım kullanılabilmektedir.

Model parametrelerinin değişen ortam koşullarına duyarlılığını değerlendirmek ve güç kayıplarını belirli bozulma mekanizmalarıyla ilişkilendirmek için hızlandırılmış testler kullanılmaktadır. Ancak, hızlandırılmış testlerin en önemli tehlikesi, bazı bozulma mekanizmalarına odaklanarak bazılarını gizleyebilmesi olarak bilinmektedir. Bu gizlenen bozulma mekanizmaları, farklı çalışma koşullarında sahada ortaya çıkabilir. Bu nedenle, bu sorunlardan kaçınmak için varsayımların altta yatan fiziksel ve kimyasal bozulma kinetikleri ile ilgili bilgi ve araştırmalara dayanması gerekmektedir. FV panellerin maruz kaldığı stresler tarafından meydana gelen bozulma mekanizmalarını Kaaya ve diğerleri [79] Şekil 2.3'deki gibi özetlemiştir.



Şekil 2.3: Degradasyon mekanizmalarının şematik diyagramı [79].

Hızlandırılmış test koşullarının açık hava şartlarına iyi bir şekilde uyum sağlaması için aşırı olmayan koşullarda ayarlanmalıdır. Çünkü aşırı koşullar, açık havada gerçekleşmeyecek yeni bozulma mekanizmalarının oluşmasına neden olabilmektedir ve bu durum modelin kalibrasyonunda yüksek belirsizliklere yol açabilmektedir. Bununla birlikte, hızlandırılmış testlerde gözlemlenen bazı bozulma mekanizmalarının, doğal yaşlanmada ortaya çıkması muhtemel değildir ve bu da

yanlış yorumlara yol açabilmektedir. Örneğin, Koehl ve diğerleri [80], çalışmalarında DH testi sırasında güç bozulmasının üç aşamasını (i) sıcaklığa bağlı indüksiyon, (ii) degradasyon ve (iii) doygunluk durumu olarak tanımlamışlardır. Bu tür bir bozulma modelini dış dünya testleri için kullanmanın bir yolu, indüksiyon süresi ve degradasyon aşamalarının dikkate alınmasıdır; çünkü, bu doğal bozulmayı daha iyi temsil etmektedir [79], [98].

Bu çalışmada degradasyon mekanizmalarından sadece hidroliz kaynaklı bozulma dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Bunun sebebi panellerin DH testi ile düzenli olarak bağıl nem ve sıcaklığa maruz bırakılmasıdır.

2.2.1. Deneysel Kinetik Model

MPP noktasındaki panel gücü (P_{MP}), üreticiler tarafından garanti belirlemek için yaygın olarak kullanıldığından dolayı bu modelde bozulma göstergesi olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda bozulma, zamanla panelin P_{MP} değerindeki aşamalı azalma olarak tanımlanmıştır. Uygulanan iklim streslerinin etkileri, başlangıçtaki gücün zamanla ne kadar azaldığıyla ölçülmektedir.

$$\frac{P_{MP}(t)}{P_{MP}(0)} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{B}{k_i t}\right)^\mu\right) \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de $P_{MP}(t)$ ve $P_{MP}(0)$ sırasıyla t ve 0 anındaki panel çıkış gücünü, k_i bozulma sürecinin bozulma hız sabitini, μ şekil parametresini ve B güç duyarlılığını temsil etmektedir. Aynı tipteki paneller incelenirken B parametresi 1 olarak varsayılabilmektedir [79].

Deneysel kinetik modeller, panellerin belirli bir zamanda maruz kaldığı streslere bağlı olarak bozulma hız sabitini (k_i) değerlendirmek için önerilmektedir. Bu durumu temsil eden genel eşitlik, denklem (2.4)'deki gibi verilmektedir.

$$\text{Stres A} + \text{Stres B} + \dots \text{Stres N} \rightarrow \text{Bozulma} \quad (2.4)$$

Kaaya ve diğerlerinin [79] çalışmasında üç ana bozulma reaksiyonunun hidroliz, foto-degradasyon ve termo-mekanik bozulma olduğu varsayılmaktadır. Uygulanan streslere bağlı olarak, bir reaksiyon sabiti hesaplanmaktadır ve belirli bir zaman diliminde güç bozulmasının etkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ancak, bu

çalışmada stres olarak sadece sıcaklık ve bağıl nem olması sebebiyle yalnızca hidroliz kaynaklı bozulmaya odaklanılmıştır. Kaaya ve diğerlerinin [79] modelleme için kullandığı hidrolitik bozulma (k_H) denklemi, denklem (2.5)'teki gibidir.

$$k_H = A_H \cdot rh_{eff}^n \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T_m}\right) \quad (2.5)$$

Burada k_H hız sabitini, A_H ön-eksponansiyel sabiti, rh_{eff} panel üzerinde etkili bağıl nemi, n parametresi nemin güç üzerindeki etkisini gösteren bir model parametresini, E_a güç bozulması için aktivasyon enerjisini (eV), k_B Boltzmann sabitini (8.62×10^{-5} eV/K) ve T_m panel sıcaklığını (K) temsil etmektedir. Denklem (2.5), nem ve sıcaklık nedeniyle bozulma etkisini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan Peck modelidir [100]. Kaaya ve diğerleri [101], çalışmalarında, Peck modelinin, DH sonuçlarının kalibrasyonunda en iyi performansı gösterdiğini belirtmiştir.

Hata süresi (t_f), bir FV panelin performansının kabul edilebilir bir seviyenin altına düştüğü ve beklenen verimlilikte enerji üretmediği zamanı vermektedir. Bu, panelin bozulma süreçlerini anlamak açısından oldukça önem taşımaktadır. Genellikle, üretici tarafından belirlenen bir eşik değeri kullanılarak tanımlanmaktadır. Bir panelin t_f değeri, genellikle başlangıçtaki maksimum güç noktasına göre %20 performans kaybına işaret eden bir değer olarak alınmaktadır. Hata süresi, panelin uzun vadeli güvenilirliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Panelin ne kadar süre verimli bir şekilde çalışacağının ve ne zaman ciddi bir bakım veya değiştirme gerektireceğinin anlaşılmasını sağlamaktadır [102].

Kaaya ve diğerlerinin [79] çalışmasında benimsenen temel varsayım, bazı bozulma süreçlerinin diğerlerinden bağımsız belirli bozulma mekanizmalarına yol açabileceği ve bazılarının sinerjistik bir doğaya sahip olabileceği yönündedir. Dolayısıyla, bu varsayım, toplam bozulma hızını, bağımsız ve bağımlı süreçlerin toplamı olarak değerlendirmektedir. Toplam bozulma hızı denklemleri kullanılarak ve güçteki kayıp %20 varsayılarak t_f değerini veren denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$t_f = \frac{B}{k_i \cdot [|\log(0.2)|]^{\frac{1}{\mu}}} \quad (2.6)$$

Bu çalışmada, ayrıca Koehl ve diğerlerinin [80] yaptığı araştırmadan esinlenerek farklı polimerlerle (EVA, ION, POE, TPO) üretilmiş paneller için güçteki bozulmanın aktivasyon enerjilerini hesaplamayı ve hata sürelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. İlgili çalışmada, birbirinden farklı beş adet FV paneline üç farklı sıcaklıkta DH testi uygulanmıştır. Güçteki bozulmanın aktivasyon enerjileri, Arrhenius ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır ve ardından DH koşulları altında dış dünya iklim koşulları ile ilişkileri incelenmiştir. Arrhenius ilişkisini etkili bir şekilde kullanabilmek için testlerin en az üç farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir; bu da, zaman ve maliyet açısından zorluklar doğurmaktadır. Bu zorlukları aşmak için, Kaaya ve arkadaşlarının [79] çalışmasındaki modelleme denklemleri baz alınarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni yaklaşımda tek sıcaklık kullanarak yapılan testler ile panellerin güçteki bozulmalarının aktivasyon enerjileri elde edilebilmektedir.

2.2.2. Boltzmann Büyüme Fonksiyonu Modeli

Boltzmann büyüme fonksiyonu, 1879'da Boltzmann tarafından önerilen, genellikle sigmoidal bir eğri oluşturan ve bir sürecin dinamik değişimini açıklamak için kullanılan matematiksel bir modeldir. Bu fonksiyon, başlangıçta yavaş bir büyüme veya azalma eğilimi sergilerken, daha sonra hızlanan bir büyüme veya azalma eğilimi göstermektedir. Özellikle biyolojik, kimyasal ve fiziksel sistemlerde ve mühendislik alanlarında değişkenlerin zamanla nasıl değiştiğini anlamak için kullanılmaktadır.

$$y(x) = 1/(1 + \exp(x)) \quad (2.7)$$

Denklem (2.7), belirli bir faktörün istikrarlı bir durumdan başka bir duruma geçiş yaptığında sergilediği davranışları tanımlamak için kullanılmıştır. Bu, geçişin tahmini için uygun bir başlangıç noktası olarak görülmektedir. Bu nedenle, orijinal fonksiyonun değiştirildiği, gerekli geometrik özellikleri içeren Boltzmann'ın sigmoidal denklemi aşağıdaki gibi önerilmektedir:

$$y(x) = y_i - (y_f - y_i)/(A + \exp(x - c/\alpha)) \quad (2.8)$$

y_i ve y_f sırasıyla geçişten önce ve sonra bağımlı değişkenin denge değerleridir, c bir dönüm noktasıdır ve α geçiş sırasında sürecin eğiminin davranışını tanımlayan ve sürecin sürekliliğini veya süreksizliğini belirleyen bir katsayıdır. Bağımsız değişkenin

her değeri için benzersiz bir bağımlı değişken değeri gözlemleniyorsa işlev sürekli olarak kabul edilir; öte yandan, α küçük ve sıfıra yakınsa, değeri kritiktir ve dönüm noktası ile uyumludur, çünkü geçiş daha hızlı olabilmektedir. A, kritik değerin konumunu, geçişin geometrik konumuna göre ayarlayan bir parametredir. Eğer $A = 1$ ise, değer geçişin ortasında yer almaktadır [103].

Bu çalışmada, Boltzmann büyüme fonksiyonu, değişkenlerin zaman içindeki değişimlerini modellemek ve büyüme veya azalma eğilimlerini açıklamak için kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, güçteki zamana bağlı değişiklikleri karakterize ederken; aynı zamanda, yeni geliştirilen deneysel kinetik model için bir doğrulama aracı olarak hizmet etmektedir. Modelleme için kullanılan Boltzmann büyüme fonksiyonu denklem (2.9)'daki gibi ifade edilmektedir [80].

$$P(t) = P_{\text{sat}} + (1 - P_{\text{sat}})/(1 + \exp(t - t_0)/s) \quad (2.9)$$

P_{sat} fonksiyonun asimptotik son sınırını temsil ederken, t_0 $(1 - P_{\text{sat}})$ değerinin yarısına ulaşıldığı zamanı göstermektedir ve s ise t_0 'da bozulmanın maksimum eğimini belirtmektedir. Bu fonksiyon, sigmoid karakteriyle, zaman içinde güçteki dinamik değişimleri açıklamak için öneme sahiptir ve çalışmanın bağlamında büyüme ve azalma eğilimlerine dair çıkarımlar sağlamaktadır.

2.2.3. Yapısal Eşitlik Modeli

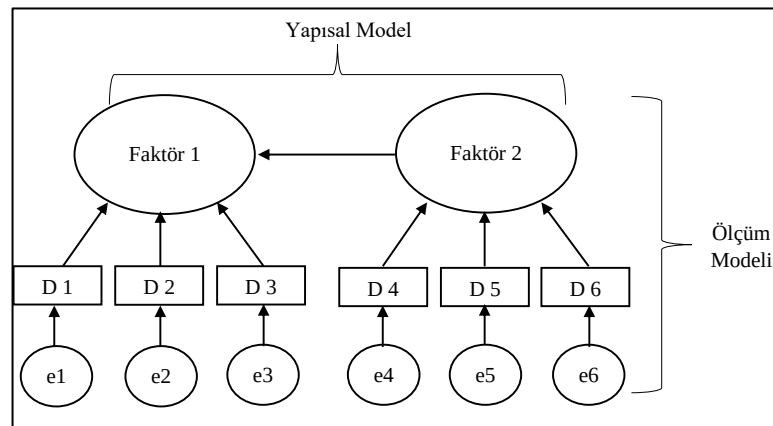
Bu çalışmada kullanılan netSEM modelinin anlaşılabilmesi için öncelikle Yapısal Eşitlik Modeli'nin (YEM) teorik altyapısı anlaşılmalıdır. YEM, değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri test etmek ve değerlendirmek için kullanılan çok değişkenli istatistiksel bir yöntemdir [104]. YEM ilk olarak birinci nesil istatistiksel tekniklerle, 1900'lerin başında Wright'ın yol analizi üzerine yaptığı çalışmalarla başlamıştır [105]-[107]. Bu dönemde YEM, nedensel modellemenin mantığının oluşturulmasına odaklanılmıştır. 20. yüzyılın ortalarında ortaya çıkan ikinci nesil teknikler sayesinde, YEM'e faktör analizi entegre edilmiş ve modelin analitik yetenekleri genişletilmiştir. Bu dönemde YEM, doğrulayıcı faktör analizi (DFA) ve yol analizinin birleşimi olarak sosyal bilimler ve iş dünyası gibi birçok alanda popüler hale gelmiştir [108]. Üçüncü nesil YEM uygulamaları ise yaklaşık 2000 yılında Judea Pearl'ün "Yapısal Nedensel Model" ve Bayesian modellemenin entegrasyonu ile başlamıştır [109], [110].

YEM, temelde DFA ve yol analizinin bir kombinasyonudur. DFA, gizli değişken veya örtük değişken olarak bilinen, doğrudan ölçülemeyen; ancak, ilgili gözlemlenebilir değişkenlerden türetilen soyut kavramları tahmin etmektedir [111], [112]. Yol analizi ise değişkenler arasındaki doğrudan ve dolaylı nedensel ilişkileri haritalamaktadır ve ölçmektedir. Bu teknikler, YEM'in ölçüm hatalarını dikkate alarak karmaşık değişken ilişkilerini kapsamlı bir şekilde anlamasına olanak tanımaktadır. YEM'in en temel özelliği tamamen teoriye dayalı olması olarak görülmektedir [113].

Standart bir YEM uygulaması ölçüm modeli ve yapısal model olmak üzere iki modelden oluşmaktadır. Ölçüm modelinde gizli değişkenler, gözlenen değişkenler ile tahmin edilerek aralarındaki ilişki değerlendirilmektedir. Yapısal modelde ise gizli değişkenler arasındaki ilişkiler ve bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler incelenmektedir. Şekil 2.4'de klasik bir YEM yapısı verilmiştir [108], [114], [115].

YEM'in uygulanması genellikle beş adım içermektedir [116], [117]:

- Model Belirleme: Teorik bilgiye dayalı olarak yapısal modelin kurulması, değişkenler arasındaki ilişkilerin tanımlanması.
- Model Tanımlama: Modelin tanımlanabilir olduğunun ve parametrelerin tahmin edilebileceğinin kontrol edilmesi.
- Model Tahminleme: Gözlenen değişkenlerden bağımsız değişkenlerin tahmininin yapılması.
- Model Değerlendirme: Uyum iyiliği indeksleri kullanılarak model uyumunun değerlendirilmesi.
- Model Modifikasyonu: Değerlendirme sonrası modelin iyileştirilmesi.



Şekil 2.4: YEM yapısı.

Bu şekilde, faktörler gizli değişkenleri, D'ler gözlenen değişkenleri, e'ler ise her bir değişken için hata terimini (artık) temsil etmektedir. Faktör ve değişkenler arasındaki bağlantılar, aralarındaki korelasyonları temsil eden yollar olarak adlandırılmaktadır. Oklar, bağımsız değişkenlerden bağımlı değişkenlere doğru yönelmektedir [114].

YEM tanımlanıp, parametre tahminleri yapıldıktan sonra modelin veriyle uyumlu olup olmadığını değerlendirmek için uyum iyiliği indeksleri kullanılmaktadır. Ayrıca, bu aşamada modelin kabul edilme veya reddedilme kararı verilmektedir. Kullanılan yaygın indekslerden bazıları aşağıda verilmektedir [108]:

- Ki-kare testi (χ^2): Model tarafından öngörülen ve gözlemlenen kovaryans matrisleri arasındaki uyumsuzluğu test eder. Bu testte, Ki-kare değerinin düşük olması beklenmektedir.
- Yaklaşık Hataların Ortalama Karekökü (RMSEA): Uyum eksikliğini gösteren modeldir. Daha düşük değerler daha iyi uyumu temsil etmektedir. RMSEA değerinin 0.05 veya daha küçük olması iyi bir uyum olarak kabul edilirken, 0.05 ile 0.08 arasındaki değerler kabul edilebilir bir uyum olarak değerlendirilmektedir. 0.08 ile 0.1 arasındaki değerler ise zayıf bir uyumu ve 0.1'in üzerindeki değerler modelin kabul edilemez olduğunu işaret etmektedir.
- Standartlaştırılmış Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü (SRMR): Uyum eksikliğini gösteren bir modeldir. Düşük değerler modelin uyumunun iyi olduğunu temsil eder. SRMR değerinin 0.05'ten küçük olması iyi bir uyumu gösterirken, 0.05-0.1 arası kabul edilebilir bir uyumdur.
- Karşılaştırmalı Uyum İndeksi (CFI): Modelin kovaryans matrisindeki varyansın ne kadarını açıkladığını ölçmektedir. Regresyon analizindeki R^2 ile açıklanabilmektedir. 1.0'a yakın değerler iyi uyumu göstermektedir.
- Tucker-Lewis İndeksi (TLI): Model karmaşıklığını ayarlayan ve 0,90 üzerinde kabul edilebilir olarak değerlendirilen bir uyum indeksidir.

2.2.4. netSEM

Geleneksel YEM'e dayanan netSEM, çeşitli bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri belirlemek için geleneksel ve veri odaklı modellerden farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada, panellerin performansını etkileyen çeşitli faktörler arasındaki karmaşık ilişkileri ve bozulma mekanizmalarının incelenmesi için netSEM güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır [118].

netSEM, çeşitli bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri keşfetmek ve bu ilişkileri belirli bir kriter (düzeltilmiş R^2) temelinde "en iyi uyumlu" modeli seçmek için bir yol sağlamaktadır [119]. YEM'in bir genelleştirmesi olan netSEM, doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modelleri kullanarak istatistiksel ilişkileri araştırmaktadır. Bu matematiksel modeller, fizik ve kimya dallarındaki alan bilgisine dayanarak seçilmektedir ve istatistiksel analiz sonuçları ile doğrulanmaktadır [120-121]. netSEM'in iteratif doğası, FV panel degradasyon modellerinin sürekli olarak iyileştirilmesine ve güçlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, daha güçlü tahminlerin elde edilmesine ve sonuç olarak gözlemlenen yaşam döngüsü boyunca panel performansının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine yol açmaktadır [122].

netSEM'in temel bileşenleri arasında stresörler/stres faktörleri (S), mekanistik (M) değişkenler ve tepkiler/yanıtlar (R) bulunmaktadır. S, bir sistem üzerindeki dış etkenleri temsil ederken; M, bu etkenlerin neden olduğu değişkenleri ifade etmektedir. R, sistemdeki değişikliklerin sonuçlarını temsil etmektedir [122]. YEM yaklaşımında, iki değişken arasındaki bağlantı gücü, j değişkeninden i değişkenine olan ilişkiyi tahmin eden modelin katsayı vektörü β_{ij} ile temsil edilmektedir [123]. Matematiksel modellerin düzeltilmiş R^2 değerleri tek tek kıyaslanarak en iyi model seçilmektedir ve bozulmaya katkıda bulunan faktörleri içeren bir yol modeline haritalanmaktadır.

Yol diyagramları, stresörler, mekanizmalar ve yanıtlar arasındaki çift taraflı ilişkileri göstermektedir. Bu diyagramlarda, oklar değişkenler arasındaki ilişkileri temsil etmektedir ve bağlantı hatları boyunca istatistiksel ölçümler sağlanmaktadır. Çok adımlı yollar, bir mekanistik değişken denkleminin diğerine yerleştirilmesiyle türetilmektedir. Örneğin, " $S \rightarrow M \rightarrow R$ " çok adımlı yolunu belirlemek için önce " $S \rightarrow M$ " ve " $M \rightarrow R$ " ilişkilerinin denklemleri elde edilmektedir; ardından, ilk modeldeki "M", ikinci modelde yerine konarak " $S \rightarrow R$ " bağımlı çok adımlı yol elde edilmektedir. Doğrudan ($S \rightarrow R$) ve çok adımlı ($S \rightarrow M \rightarrow R$) yollar arasındaki nicel karşılaştırma, gözlemlenen yanıt ile tahmin edilen yanıt arasındaki kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılarak yapılmaktadır (denklem (2.10)). Bu denklemde, ham gözlem (y_i) ve tahmin edilen yanıt ($\hat{y}_i$), uygun model kullanılarak hesaplanmaktadır. RMSE değeri ne kadar küçükse gözlemlenen yanıt ile tahmin edilen değerler o kadar birbirine yakındır. RMSE, gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı hesaplamaktadır [122].

netSEM, özellikle doğrusal olmayan fonksiyon formlarını ve doğrusal değişim noktası modellerini içerecek şekilde genelleştirilmiştir. Kullanılan modeller **Tablo 2.2**'de verilmektedir. Bu, fiziksel ve kimyasal degradasyon süreçlerinde görülen çeşitli fonksiyon formlarını modelleme yeteneği sağlamaktadır [120]. netSEM'in avantajları arasında karmaşık ilişkilerin doğru bir şekilde modellenenbilmesi ve doğrusal olmayan etkilerin dikkate alınabilmesi bulunmaktadır.

Tablo 2.2: netSEM'in kullandığı modeller.

Modeller	Fonksiyonlar
Doğrusal model	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$
İkinci dereceden model	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$
Basit ikinci dereceden model	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$
Üstel model	$y = \beta_0 e^{\beta_1 x} + \varepsilon$
Logaritmik model	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + \varepsilon$
Doğrusal olmayan en küçük kareler modeli	$y = f(x, \beta) + \varepsilon$
Değişim noktası modeli	$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon & \text{eğer } x < x_c \\ \gamma_0 + \gamma_1 x + \varepsilon & \text{eğer } x \geq x_c \end{cases}$

Bu çalışmada, S, M ve R değişkenleri arasındaki ilişkileri açıklayan bozulma yol modelleri oluşturmak için I-V ölçümlerinden elde edilen parametreler kullanılmıştır. Zaman, stres faktörü olarak yer alırken, mekanistik değişkenler ise I_{SC} , V_{OC} , FF ve R_s parametreleridir. Yanıt ise P_{MP} ile temsil edilmektedir. netSEM'de, stres faktörleri, mekanizmalar ve yanıtlar arasındaki ilişkileri göstermek için grafiksel diyagramlar oluşturulmaktadır. Bu diyagramlarda oklar, ilişkilerin gücünü simgelemektedir; koyu oklar daha güçlü bağlantıları, ince oklar ise daha zayıf bağlantıları belirtmektedir.

Elde edilen ilişkilerde gözlemlenen yanıtların tahmin edilen değerlere yakınlığını değerlendirmek için RMSE kullanılmaktadır. Bu metrik, doğrudan ve çok adımlı modeller arasında karşılaştırma yapılmasına da olanak sağlamaktadır. RMSE formülü aşağıdaki gibidir. Burada, n gözlem sayısını, y_i gözlemlenen değerleri ve $\hat{y}_i$ tahmin edilen değerleri temsil etmektedir [119], [122]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.10)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada dört farklı kapsülleyici malzeme (EVA, ION, POE, TPO) kullanılarak üretilen FV panellerin, 85°C sıcaklık ve 85% bağıl nem koşulları altında 5000 saatlik nemli ısı testi sonrası yapısında meydana gelen degradasyon mekanizmaları analiz edilmektedir. Bu analiz, panellerin güç çıkışlarındaki azalma ve elektriksel parametreleri yorumlanarak yapılmaktadır.

3.1. Farklı Modeller ile Güç Düşüşünün İncelenmesi

3.1.1. DeneySEL Kinetik Model

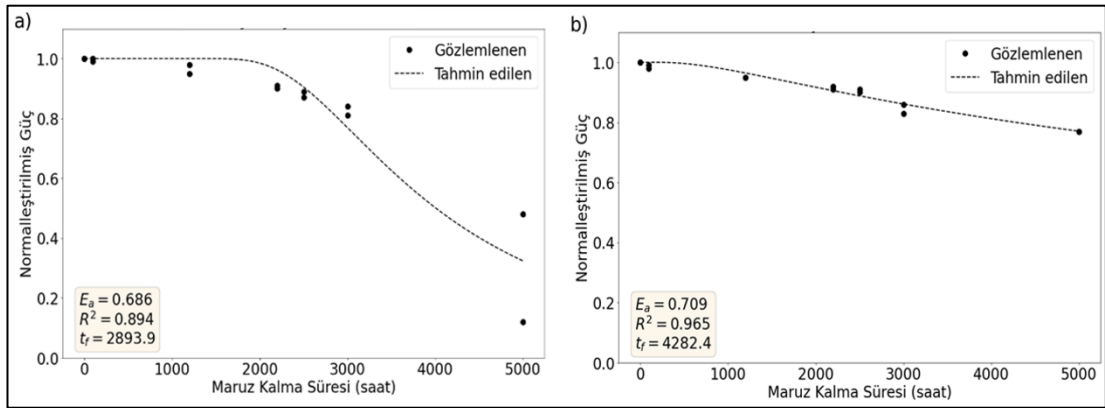
Yeni geliştirilen yaklaşım, tek bir sıcaklık kullanarak güç düşüşündeki aktivasyon enerjisini hesaplamayı hedeflemektedir. Bu yöntemde, model parametrelerinin (E_a , μ , n , A , t_f) optimum değerleri Python programlama dili kullanılarak doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile belirlenmiştir. Ardından, ilgili t_f değerleri hesaplanmıştır. Modellenen ve ölçülen veriler arasındaki ilişki, R^2 kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir panel için belirlenen 0.85'in üzerindeki R^2 değerleri, tahmin ve ölçüm verileri arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Elde edilen parametreler **Tablo 3.1**'de özetlenmiştir.

Bu çalışmada, her bir kapsülleyici ile hazırlanan paneller, kenar sızdırmazlık bandı içeren (+SB) ve içermeyen olacak şekilde iki farklı konfigürasyon halinde incelenmiştir. Modelleme sonucu elde edilen aktivasyon enerjisi ve diğer model parametreleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir. Bu sonuçlar, bant kullanımının ve polimer çeşidinin bozulma davranışına etkisini anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır.

Tablo 3.1: DeneySEL kinetik modelde elde edilen parametreler.

Panel Tipi	Parametreler					
	E_a (eV)	μ	n	A	t_f (sa)	R^2
EVA	0.686	2.587	1.517	1501.4	2893.9	0.894
EVA+SB	0.709	0.572	1.458	1456.4	4284.4	0.965
ION	0.703	0.821	1.489	1488.8	3847.6	0.979
ION+SB	0.698	1.373	1.514	1513.4	3639.7	0.979
POE	0.702	0.743	1.489	1489.6	3566.8	0.957
POE+SB	0.707	0.660	1.465	1465.5	4340.2	0.922
TPO	0.704	0.743	1.481	1480.9	3935.0	0.981
TPO+SB	0.706	0.628	1.469	1469.4	4000.2	0.865

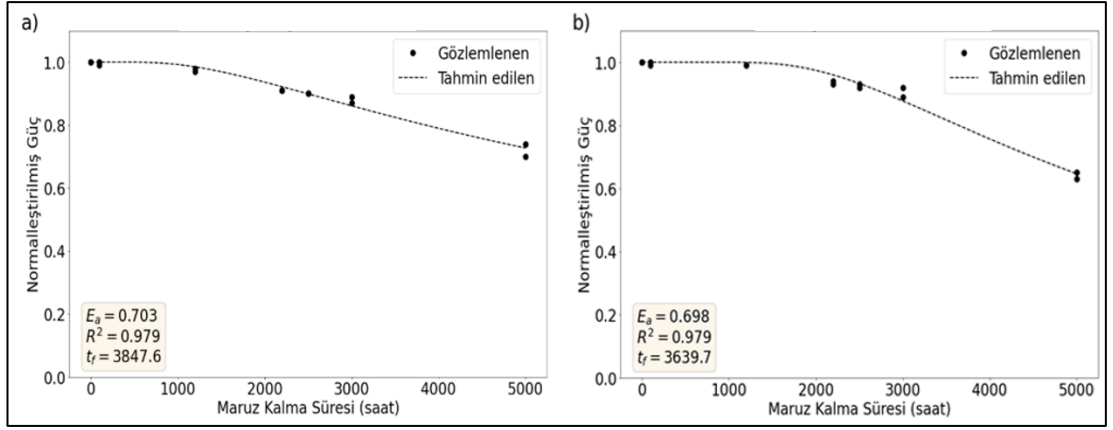
Şekil 3.1'de EVA ile kapsüllenen paneller için 5000 saatlik DH testinin sonuçları görülmektedir. **Şekil 3.1.a** (EVA) ve **Şekil 3.1.b** (EVA+SB) grafikleri incelendiğinde paneller arasında dikkate değer farklılıklar gözlemlenmektedir. EVA panelinde 5000 saat sonunda gücün geldiği son değer yaklaşık %32 iken, EVA+SB panelinde bu değer %77'dir. Hata süreleri kıyaslandığında ise EVA panelinde t_f değeri 2893.9 saat iken, EVA+SB panelinde 4282.4 saat olduğu görülmektedir. Bu durum EVA panelinin bozulmasının daha hızlı gerçekleştiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 3.1: EVA paneli (a) ve EVA+SB paneli (b) için güç bozulma profili

Aktivasyon enerjileri karşılaştırıldığında ise EVA paneli için 0.686 eV bulunurken, EVA+SB paneli için 0.709 eV olarak tahmin edilmiştir. E_a değerleri arasındaki fark çok büyük ölçüde olmasa da sızdırmazlık bandı kullanılmadığında aktivasyon enerjisinin daha düşük elde edilmesi, bu panelin daha belirgin bir bozulma göstermesi ile uyumludur. EVA panelinde test sonunda iki numune için elde edilen farklı sonuçlar modelin R^2 değerinde düşüşe neden olmuştur. Aynı panel yapısı için bu farklı değerlerin ortaya çıkmasının panel üretiminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Diğer model parametreleri incelendiğinde, modelin tahmin gücü üzerinde aktivasyon enerjiden ziyade şekil (μ) parametresinin daha baskın olduğu görülmektedir.

Şekil 3.2'de 5000 saatlik DH testi sonunda ION ile kapsüllenen panellerin güç profillerini görülmektedir. Son durumda, ION paneli %73'lük güç değerini korurken, ION+SB paneli %65'lik bir güç değeri sergilemektedir. Bu durum teorik olarak beklentilerin dışındadır. Sızdırmazlık bandının kullanıldığı ION+SB panelinin içerisine nem girişinin azalması ve dolayısıyla daha düşük güç düşüşü göstermesi beklenirken, elde edilen sonuçlar aksi bir durumu göstermektedir. Bu beklenmeyen sonuca etki edebilecek olası nedenler ilerleyen bölümlerde tartışılacaktır.

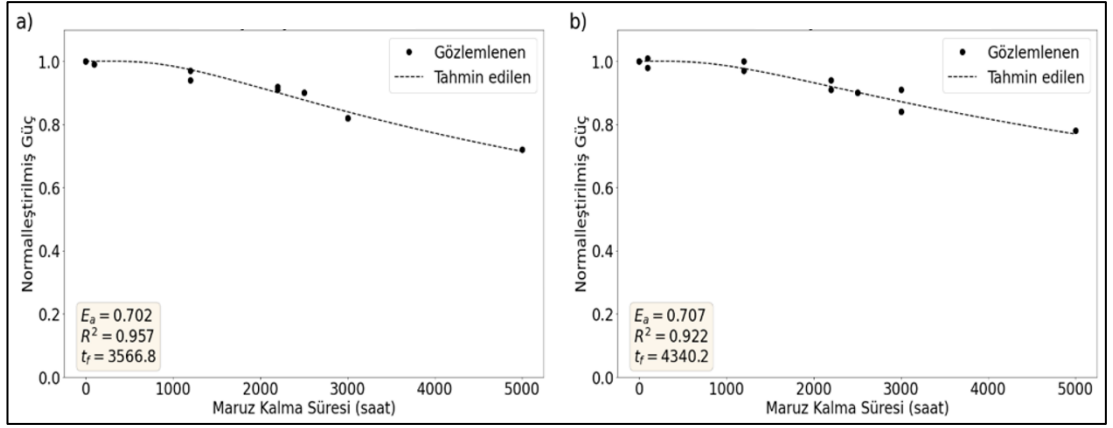


Şekil 3.2: ION paneli (a) ve ION+SB paneli (b) için güç bozulma profili

Hata süresi değerlerine bakıldığında, ION panelinde 3847.6 saat elde edilirken, ION+SB paneli için 3639.7 saat tespit edilmiştir. Her iki panel için aktivasyon enerjileri yakın bir şekilde bulunmuştur. ION ve ION+SB panelleri için bu değerler sırasıyla 0.703 eV ve 0.698 eV olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin birbirine yakınlığı, güç profillerinde gözlemlenen küçük farklılıklara rağmen, ION ile hazırlanan panellerinin bozulma davranışlarının benzer eğilimlere sahip olduğu sonucunu göstermektedir.

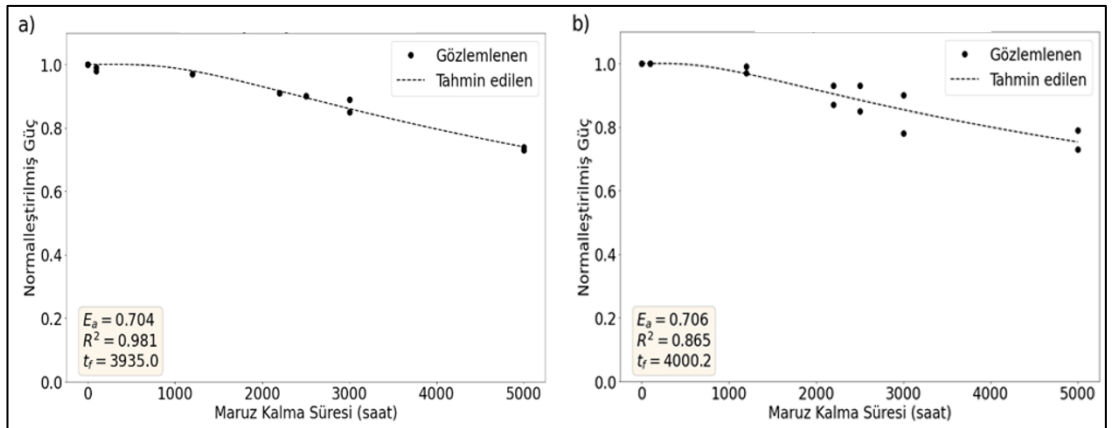
Şekil 3.3, DH testi sırasında POE ile kapsüllenen panellerinin güç azalma profilleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Güç değerleri, POE panelinde %71'e düşerken, POE+SB paneli için bu değer %77 olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuç, Sızdırmazlık bandının kullanıldığında POE panelinin beklentilere uygun olarak daha az bozulduğunu göstermektedir. Bu durum, t_f değerleri incelendiğinde daha belirgin görülmektedir. POE paneli, 3566.8 saatlik bir t_f değerine sahipken, POE+SB paneli daha uzun bir t_f değeri olan 4340.2 saate sahiptir. Panel içerisine nem girişinin önlenmesi ve kullanılan polimerik malzemenin nem ile etkileşimin düşük olması bu durumda önemli bir rol oynamıştır.

Aktivasyon enerjileri incelendiğinde ise birbirine çok yakın oldukları görülmektedir. Aktivasyon enerjisi, POE paneli için 0.702 eV iken POE+SB panelinde 0.707 eV olarak hesaplanmıştır. Sızdırmazlık bandının kullanılmayan panelin aktivasyon enerji değerinin düşük olması güçteki azalma profilleri ile uyumludur. Benzer aktivasyon enerjilerine rağmen, güç azalması ve t_f değerlerindeki farklılık, sızdırmazlık bandı uygulamasının POE panellerin DH testi koşulları altında dayanıklılığını arttırmadaki önemini göstermektedir.



Şekil 3.3: POE paneli (a) ve POE+SB paneli (b) için güç bozulma profili

Şekil 3.4'teki TPO ile kapsüllenen paneller incelendiğinde, TPO paneli ile TPO+SB paneli arasındaki güç kaybı değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir ve sonuçlar POE paneli ile benzerlik göstermektedir. TPO panelinde test sonunda güç değeri yaklaşık %74 iken, TPO+SB panelinde bu değer %75 civarındadır. Hata süreleri karşılaştırıldığında, TPO paneli için 3935 saat iken TPO+SB paneli için 4000.2 saat bulunmuştur. Panel yapısının nemden korunması ve kullanılan malzemenin nem geçirgenliğinin düşük olması elde edilen sonuçlarda etkili olmuştur. Aktivasyon enerjilerinin analizi de bu gözlemi desteklemektedir. TPO paneli için aktivasyon enerjisi 0.704 eV iken, TPO+SB paneli için bu değer 0.706 eV olarak hesaplanmıştır. TPO panelleri için elde edilen sonuçlarda, sızdırmazlık bandı kullanılmasının güç düşüşü veya t_f üzerinde etkisinin olumlu olduğu, fakat bu etkinin önemli düzeyde olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.4: TPO paneli (a) ve TPO+SB paneli (b) için güç bozulma profili

3.1.2. Boltzmann Büyüme Fonksiyonu Modeli

Sigmoidal yapıya sahip Boltzmann büyüme fonksiyonu kullanılarak yeniden modelleme yapılmış ve bu modelden elde edilen hata zamanı ile deneysel kinetik modelden elde edilen hata zamanı arasındaki tutarlılık incelenmiştir.

Tablo 3.2: Deneysel kinetik model ile Boltzmann modelinin karşılaştırılması.

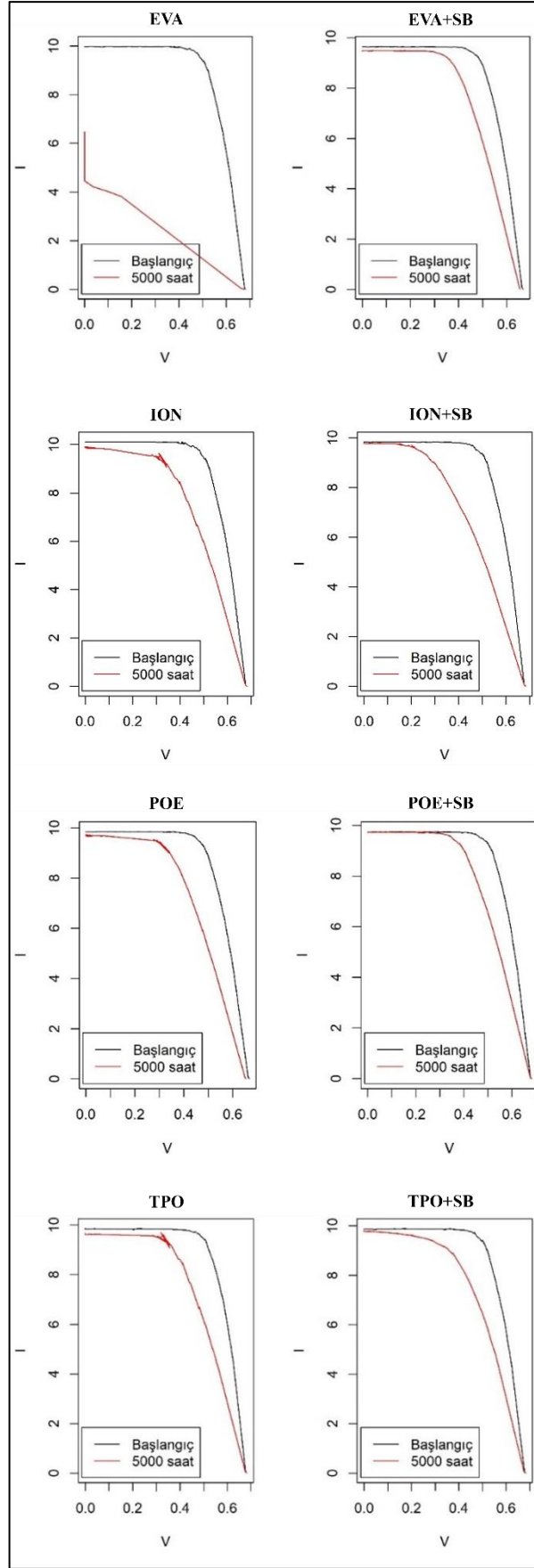
Panel Tipi	Deneysel Kinetik Model	Boltzmann Büyüme Fonksiyonu
	t_f (sa)	t_f (sa)
EVA	2893.9	3033.1
EVA+SB	4284.4	3965.1
ION	3847.6	3804.9
ION+SB	3639.7	3750.0
POE	3566.8	3348.8
POE+SB	4340.2	4179.4
TPO	3935.0	3287.0
TPO+SB	4000.2	3520.0

Boltzmann modeli ile elde edilen zamana bağlı güç grafikleri Ek-A’da sunulmuştur ve her iki modelden elde edilen hata zamanları **Tablo 3.2**’de özetlenmiştir. Boltzmann modeli ve deneysel kinetik model arasındaki güç düşüş profillerinin karşılaştırılması, her bir panel için benzerlikler göstermektedir. İki model arasındaki hata sürelerinde küçük farklılıklar olmasına rağmen, sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen paneller arasındaki ilişkinin incelenmesi, tutarlı bir sonuç ortaya koymaktadır.

Önemli bir nokta olarak, her iki model de elde edilen sonuçların doğruluğunu gösteren 0.85’in üzerinde R^2 değerleri sergilemektedir. Genel olarak, sızdırmazlık bandı kullanılmayan EVA panelinde önemli bir güç düşüşü yaşanırken, diğer panellerin daha az güç düşüşü yaşadığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlenen güç düşüşüne katkıda bulunan faktörleri daha iyi anlamak için, zaman içinde elektriksel parametrelerdeki değişimlerin ve bunların birbirleriyle ilişkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi netSEM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, gözlemlenen sonuçları etkileyen faktörler hakkında kapsamlı bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

3.1.3. I-V Eğrilerinin Alınması

Bu bölüm, panellerin test öncesi ve sonrası I-V ölçümleri içermektedir ve zaman içinde elektriksel parametrelerdeki değişimlere dair bilgiler önemli sunmaktadır. Bu bilgiler, degradasyon mekanizmalarının anlaşılması için temel oluşturmaktadır.



Şekil 3.5: Tüm paneller için test öncesi ve sonrası I-V eğrileri.

Şekil 3.5'te panellerin DH testi öncesi ve sonrası I-V eğrileri bulunmaktadır. Eğriler incelendiğinde, her bir panel için P_{MP} değerine denk gelen noktaların ve eğrilerin altında kalan alanlarının başlangıç durumuna kıyasla azaldığı görülmektedir. Eğrinin altında kalan alan, FF ile ilişkilidir. Bu nedenle, tüm panellerde FF değerinin başlangıç durumuna kıyasla azaldığı söylenebilir. Akım değerleri, EVA paneli hariç diğer sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen panellerde hemen hemen aynı kalmıştır.

Tablo 3.3, elektriksel parametrelerde meydana gelen değişiklikleri net bir şekilde gözlemlemek için başlangıç ve son değerleri vurgulamaktadır. Tabloda sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen her konfigürasyon için iki numune verilmiştir. Çalışmada çıkarımların tutarlılığı ve güvenilirliğinin artması için iki numune kullanılmıştır.

Tablo 3.3: Panellerin başlangıç ve son koşuldaki elektriksel parametreleri.

Panel	Zaman (sa)	P_{MP} (W)	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	FF (%)	R_s (Ω)
EVA ₁	0	4.73	9.98	0.68	69.44	0.02
	5000	0.59	4.41	0.67	19.86	0.14
EVA ₂	0	4.61	9.94	0.68	68.60	0.02
	5000	2.23	8.22	0.67	40.51	0.05
EVA ₁ +SB	0	4.54	9.70	0.68	69.32	0.02
	5000	3.49	9.60	0.67	54.34	0.03
EVA ₂ +SB	0	4.46	9.65	0.67	69.17	0.02
	5000	3.44	9.49	0.66	55.27	0.03
ION ₁	0	4.77	10.11	0.68	69.21	0.02
	5000	3.36	9.88	0.68	49.92	0.03
ION ₂	0	4.77	10.06	0.68	69.53	0.02
	5000	3.55	9.43	0.68	55.35	0.03
ION ₁ +SB	0	4.67	9.82	0.68	69.75	0.02
	5000	3.05	9.81	0.68	45.71	0.04
ION ₂ +SB	0	4.69	9.82	0.68	69.94	0.02
	5000	2.94	9.77	0.68	44.13	0.04
POE ₁	0	4.46	9.84	0.67	67.93	0.02
	5000	3.20	9.68	0.65	50.64	0.03
POE ₂	0	4.61	9.92	0.68	68.81	0.02
	5000	-	-	-	-	-
POE ₁ +SB	0	4.57	9.97	0.66	68.98	0.02
	5000	-	-	-	-	-
POE ₂ +SB	0	4.66	9.73	0.68	70.23	0.02
	5000	3.63	9.72	0.68	54.88	0.03
TPO ₁	0	4.75	9.89	0.68	70.48	0.01
	5000	3.52	9.70	0.68	53.34	0.03
TPO ₂	0	4.75	9.85	0.68	70.80	0.01
	5000	3.46	9.63	0.68	52.87	0.03
TPO ₁ +SB	0	4.71	9.87	0.68	69.99	0.02
	5000	3.45	9.78	0.68	51.77	0.03
TPO ₂ +SB	0	4.71	9.86	0.68	69.88	0.02
	5000	3.72	9.79	0.68	55.68	0.03

EVA ile hazırlanan panellerin detaylı incelenmesi, EVA_1 ve EVA_2 için I_{SC} , FF ve R_s değerleri üzerinde önemli değişiklikler ortaya koymaktadır. Özellikle, EVA_1 için I_{SC} başlangıçta yaklaşık olarak 9.9 A'dan son durumda 4.4 A'e düşmektedir. FF, 69.44'ten 19.86'ya önemli ölçüde azalırken, R_s ise 0.02 Ω 'ten 0.14 Ω 'e yükselmektedir. Bununla birlikte, V_{OC} değeri minimal bir değişiklik göstermektedir. EVA_1+SB ve EVA_2+SB için, I_{SC} ve V_{OC} değerleri küçük dalgalanmalar gösterirken, FF azalmakta ve R_s artmaktadır.

ION ile hazırlanan panellerde başlangıç ve son durumlardaki güç dışındaki parametreler incelendiğinde, FF değerinde önemli bir azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma durumu, sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen paneller için benzer profil çizmektedir. Hatta, ION+SB panelleri için daha fazla FF düşüşü olduğu görülmektedir. Ayrıca, tüm panellerde R_s değerinde bir artış mevcuttur; ancak, I_{SC} ve V_{OC} değerlerinde belirgin bir azalma görülmemektedir.

POE ile hazırlanan panellerde R_s değerlerinde artış ve FF değerinde azalma görülürken, I_{SC} ve V_{OC} değerlerinde belirgin bir fark gözlenmemektedir. Ancak, POE_2 ve POE_1+SB panellerinde camda kırılma meydana gelmesi sebebiyle testin 5000 saat değerleri alınamamıştır. Camda kırılma meydana gelmesi, panellerin üretim sürecinde meydana gelen hatalardan kaynaklandığı sonucunu göstermektedir. Kullanılan camda hataların bulunduğu ve test sırasında ortaya çıkan termal stresler nedeniyle kırılıma neden olduğu görülmektedir. Buna rağmen, sağlam olan POE_1 ve POE_2+SB panellerdeki genel eğilim, FF değerlerinde azalma olurken, R_s değerlerinde artış olduğunu göstermektedir.

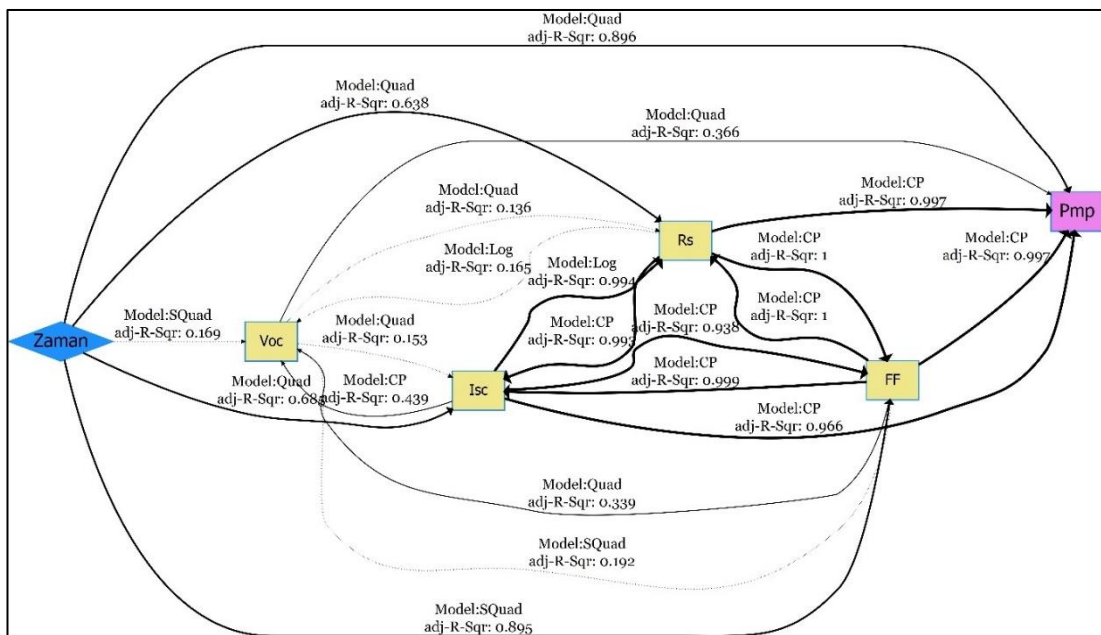
TPO ile hazırlanan panellerin incelenmesi, I_{SC} ve V_{OC} değerlerinde minimal değişikliklerle birlikte, FF ve R_s değerlerinde önemli değişikliklerin gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. POE ve ION ile hazırlanan panellerde olduğu gibi, TPO ile hazırlanan panellerde de FF değerlerinin azaldığı ve R_s değerlerinin arttığı görülmektedir.

Özetle, panellerde en önemli farklılıklar FF ve R_s parametrelerinde bulunmaktadır. Sızdırmazlık bandı içermeyen EVA panelleri, yapılarında meydana gelen büyük ölçekli bozulmaya bağlı olarak önemli bir akım azalmasıyla dikkat çekmektedir. FF ve R_s değerlerinde gözlenen belirgin eğilimler, DH koşullarında panellerin performans özellikleri ve yapısal bütünlüğü hakkında değerli çıkarımlar sunmaktadır.

3.2. netSEM Analizi ve Degradasyon Mekanizmaları

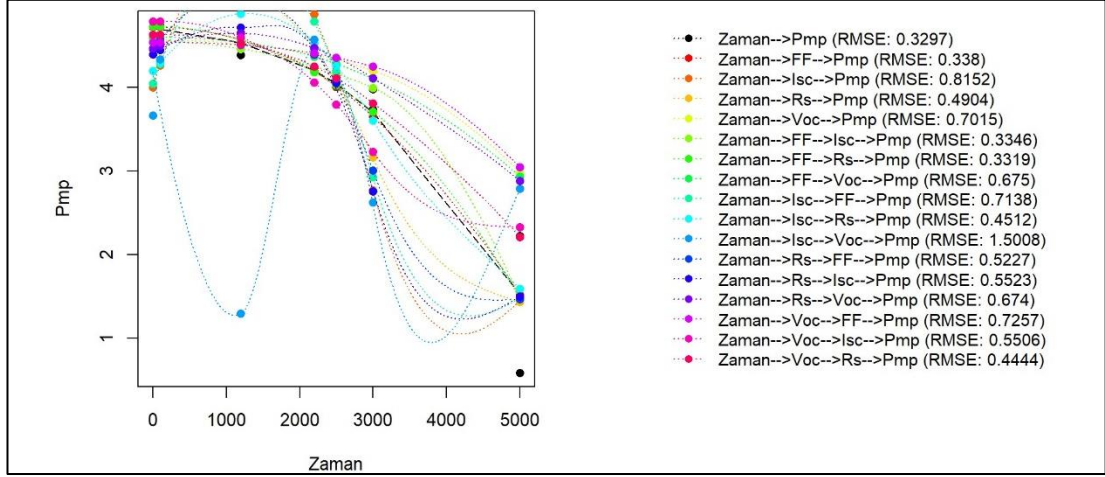
netSEM analizinin temel amacı, test zamanı ile güç arasındaki ilişkiyi açıklayabilecek en iyi yolu belirlemektir. Her bir panel için 5000 saat boyunca ölçülen I_{SC} , FF , R_S ve V_{OC} değerlerini kullanarak, bu mekanistik değişkenler ile güç ve zaman arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu analizde, zaman birincil stres faktörü olarak alınmıştır. P_{MP} ise yanıt değişkenidir. I_{SC} , FF , R_S ve V_{OC} parametreleri mekanistik değişkenler olarak yer almıştır. Bu çalışma için zayıf, orta ve güçlü ilişkiler için R^2 eşik değerleri sırayla 0,3, 0,6 ve 0,9 olarak belirlenmiştir. Bu gösterim, yalnızca matematiksel bir ifadedir ve aralarında herhangi bir neden-sonuç ilişkisini belirtmemektedir. Neden-sonuç ilişkisi, gözlemlenen değişimlerin altında yatan fiziksel ve kimyasal mekanizmaların açıklanması ile mümkün olmaktadır.

Öncelikle sızdırmazlık bandı içermeyen EVA paneli için **Şekil 3.6**'ya bakıldığında ilişkilerdeki R^2 değerlerinden Zaman- P_{MP} ile Zaman-FF arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Zaman- I_{SC} ile Zaman- R_s arasında orta düzeyde bir ilişki vardır. FF- R_s , FF- I_{SC} , I_{SC} -FF, R_s - P_{MP} , FF- P_{MP} , I_{SC} - P_{MP} arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Yarı iletken malzemenin iç kalitesinde herhangi bir değişiklik olmadığından V_{OC} parametresinin diğer parametrelerle güçlü bir ilişkiye sahip olmaması beklenen bir durumdur.



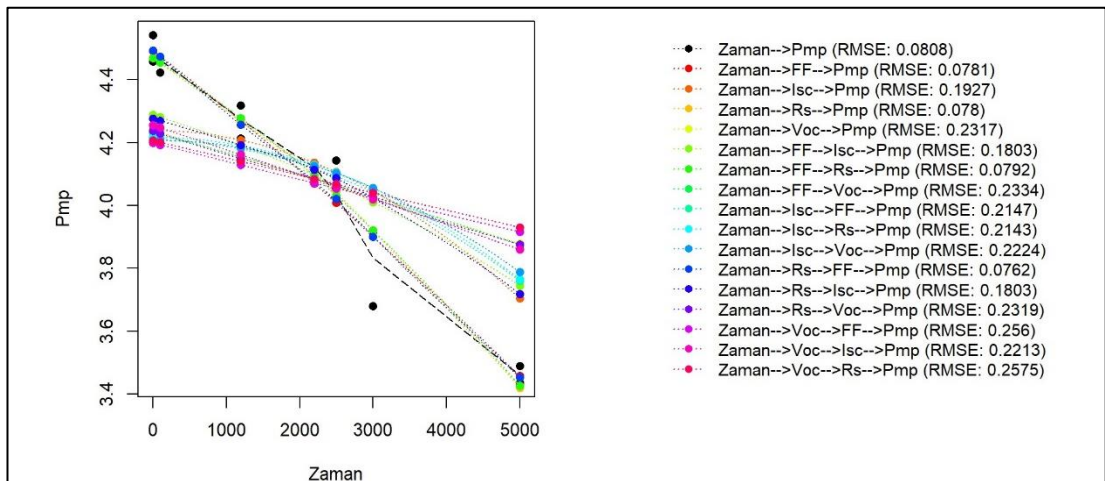
Şekil 3.6: EVA paneli için netSEM diyagramı.

Zaman- R_S -FF- I_{SC} - P_{MP} ilişkilerinin güçlü olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, güçte düşüşe neden olan FF değeri kaybının, R_S değerinin artmasına ve I_{SC} değerinin azalmasına bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8: EVA paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.

Şekil 3.9'dan EVA+SB paneli için RMSE değeri düşük olan yollar incelendiğinde, Zaman- R_S - P_{MP} , Zaman-FF- P_{MP} , Zaman-FF- R_S - P_{MP} ve Zaman- R_S -FF- P_{MP} değerlerinin en küçük RMSE değerlerine sahip olduğu görülmektedir. FF, akım ve seri dirence bağlı olarak değişebileceği için burada izlenecek en uygun yol, RMSE değeri en küçük olan Zaman- R_S -FF- P_{MP} yoludur. R_S değerinin artması ve FF değerinin azalması buradaki güç düşüşünü açıklayan en iyi yoldur. Mekanistik değişken sayısı artırıldığında RMSE değeri küçük olan başka bir yol bulunmamıştır. I_{SC} değerinde belirgin bir değişiklik olmadığı için bu beklenen bir durum olarak görülmektedir.



Şekil 3.9: EVA+SB paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.

ION, POE ve TPO bazlı paneller için de netSEM modeli uygulanmıştır. Bu panellerin netSEM diyagramları Ek-B’de ve bozulma yolları ile ilgili çıkarım yapılan mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkileri Ek-C’de verilmiştir. Tüm panellerin analizi sonucunda, sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen paneller arasındaki en önemli farkın EVA ile hazırlanan panellerde olduğu görülmektedir. Sızdırmazlık bandı içermeyen EVA panelinde güç bozulması, I_{SC} , R_s ve FF parametrelerinden etkilenirken, diğer tüm panellerde bozulmanın sadece R_s ve FF parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir.

3.3. Kenar Sızdırmazlık Bandının Degradasyona Etkisi

Panellerin yaklaşık 30 yıllık kullanım ömrü boyunca performansını koruması ve daha etkili çalışması için nem girişinin korunması kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada üretilen panellerin ön ve arka yüzeyden nem girişini engellemek için cam malzeme tercih edilmiştir; ancak, nemin kenarlardan panel içerisine nüfuz etmesi olasıdır. Bu nedenle, panel kenarlarına poliizobütilen (PIB) bazlı kenar sızdırmazlık bandı uygulaması yapılmıştır.

PIB, düşük WVTR değeri, yüksek UV ve sıcaklık direnci, mükemmel yapışma ve kolay uygulanabilirlik özellikleri sayesinde FV endüstrisinde öne çıkan malzemelerden biridir. Düşük camsı geçiş sıcaklığı, düşük difüzivite katsayısı ve esnek yapısıyla avantaj sağlamaktadır [124], [125]. Bu bölümde sızdırmazlık bandı kullanımının nem girişini en aza indirmedeki önemli rolü incelenmektedir. Sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen panellerin performansları karşılaştırarak, bu uygulamanın olumlu etkileri ele alınmaktadır.

EVA ile hazırlanmış paneller incelendiğinde, sızdırmazlık bandı içeren ve içermeyen panellerin performansları karşılaştırıldığında belirgin bir fark ortaya çıkmaktadır. Güç bozulma profilleri ve netSEM analizi, sızdırmazlık bandı kullanılmayan panel için test sonundaki gücün değerini %32 olarak göstermiştir. Buna karşın, sızdırmazlık bandı kullanıldığında güç düşüş oranı önemli ölçüde azalmaktadır ve nihai güç değeri %77 olarak elde edilmiştir.

Sızdırmazlık bandı panelin kenarlarını kaplayarak ortamdaki nemin panele yapısına girişini önlemektedir. Hücre metalizasyonunda korozyonun meydana gelmesini ve diğer bozulma mekanizmalarını önlemek veya en aza indirmek için ortama nem girişinin minimum düzeyde olması gerekmektedir. EVA panelinde bozulmanın yüksek

derecede gerçekleşmiş olması EVA polimerinin hidrofilik doğasına da atfedilmektedir. EVA, vinil asetat içeren bir polimerdir ve vinil asetat içerisinde asetil grubunun bulunması nedeniyle suyla kolayca reaksiyona girmektedir. Vinil asetatın hidrolizi sonucu ortamda asetik asit oluşumu meydana gelmektedir. Oluşan asetik asit panel yapısında ön ve arka levha olarak cam kullanıldığında, camda gaz geçirgenliği olmadığı için, panel yapısı dışına çıkamaz ve dolayısı ile panel yapısı içerisinde birikebilir. Bu durum, hücre metalizasyonunda korozyon oluşumunu hızlandırmaktadır. Böylece, EVA paneline nem girdiğinde korozyon meydana gelmektedir ve panel performansı olumsuz etkilenmektedir. Bu durumda, korozyon oluşumu hem nemin tek başına neden olduğu ve nemin EVA polimerini hidrolize etmesi sonucu oluşan asetik asidin korozyonu hızlandırma yolu ile gerçekleşmektedir. Korozyon, hücredeki seri direnci artırır. Seri direnç arttıkça akım azalır. Akımdaki azalma FF parametresini azaltır ve bu da güçte azalmaya neden olur. EVA paneline sızdırmazlık bandı uygulandığında ise nem girişi minimum düzeye indirgendiiği için bozulma çok daha yavaş gerçekleşmektedir. Güç profillerine bakıldığında sızdırmazlık bandı kullanımının EVA ile hazırlanan paneller üzerinde oldukça etkili bir çözüm sunduğu görölmüştür.

ION ile hazırlanmış paneller için, beklenilenin aksine, sızdırmazlık bandı kullanıldığında güç düşüşünün, kullanılmadığı duruma göre daha büyük olduğu görölmüştür. Kempe ve diğerlerinin [124] çalışması da genel beklentinin sızdırmazlık bandı kullanımının nem girişini azaltarak olumlu bir katkı yapması yönünde olduğunu desteklemektedir. PIB kenar sızdırmazlık bandı ile iyonomer polimeri ile kullanımı durumunda, nemli ısı testi (85°C ve %85 RH) koşullarında, panellerin yaklaşık 7000 saat boyunca nem girişine dayanabileceği tahmin edilmiştir. Buna karşın, iyonomer polimeri için yapılan modelleme çalışmasında, 20°C’de nemin 20 yıllık bir süre boyunca ancak 5 cm derinliğe kadar nüfuz edebileceği belirtilmiştir. Bu sonuçlar, PIB sızdırmazlık bandının iyonomer polimerine kıyasla daha düşük nem geçirgenliği sergilediğini ve sızdırmazlık bandı kullanan panellerin nem girişini önlemede daha etkili olması gerektiğini doğrulamaktadır.

Bu çalışmada gözlemlenen sonucun literatürle çakışması, sızdırmazlık bandı kullanımı veya polimerin kendisinden bağımsız olarak panel üretim esnasında oluşabilecek uygulama hatalarına; örneğin, laminasyon işleminde yetersiz vakumlama nedeniyle oluşan hava kabarcıklarına, atfedilmektedir. Laminasyon işlemi esnasında paneller

yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına maruz kalmakta ve neticede oluşan iç stresler panel performansını olumsuz etkileyebilmektedir [126]. Kabarcık oluşumu, delaminasyon probleminin önünü açan bir durumdur. Yapılan bir çalışmada, 22 yıl çalışan bir FV panelin bozulma mekanizmaları incelenmiş ve kabarcık oluşumu olan panellerin daha fazla güç bozulması yaşadığı sonucuna varılmıştır [127]. Bant kullanımının genellikle nem girişini azaltarak olumlu bir etki oluşturması beklenirken, ION polimeri ile kapsüllenen panellerde bu sonuç gözlemlenmemiştir.

POE ile hazırlanmış panellerde, sızdırmazlık bandının uygulanması panel performansında küçük düzeyde bir iyileşmeye sağlamıştır. Sızdırmazlık bandı içeren panelde test sonunda P_{MP} değeri %77 olarak belirlenirken, içermeyen panelde bu değer %71 olarak gerçekleşmiştir.

TPO ile hazırlanmış panellerde ise durum biraz farklıdır. Sızdırmazlık bandının etkisi minimal düzeyde gerçekleşmiştir. Sızdırmazlık bandı içeren panelde test sonunda P_{MP} değeri %75 olarak, içermeyen panelde ise bu değer %74 olarak belirlenmiştir.

Özetlemek gerekirse, çeşitli kapsülleyici malzemeler ile üretilen panellerde sızdırmazlık bandı uygulamasının etkisi sistematik olarak incelenmiş ve bulgular özellikle EVA polimeri ile sızdırmazlık bandı kullanımının önemli düzeyde bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. ION polimeri için ise sızdırmazlık bandı kullanımının etkisi (tahminen üretim kaynaklı hatalardan dolayı) tam olarak tespit edilememiştir. POE ve TPO polimerlerinde ise sızdırmazlık bandı uygulamasının olumlu etkileri belirgin olsa da bu etkiler EVA polimeri ile karşılaştırıldığında nispeten daha azdır. Burada POE ve TPO polimerlerinin yapısal ve su geçirgenlik özellikleri de etkili olmuştur. Bu sonuçlar, 5000 saat olarak uygulanan nemli ısı test koşullarına dayanmaktadır. Test süresinin uzatılması veya test koşullarının değiştirilmesi durumlarında, elde edilen sonuçlarda potansiyel değişiklikleri ortaya çıkarabilir.

3.4. Kapsülleyici Malzemenin Degradasyona Etkisi

Panel performansını etkileyen çeşitli faktörler olsa da bu çalışmada odak noktası olarak nem, sıcaklık ve asetik asit oluşumu üzerine odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan ve EVA polimerine alternatifi olarak seçilen malzemelerde asetik asit oluşumu meydana gelmemektedir. Bu sebeple, nemin panel içerisine nüfuz etmesi ve polimer ile etkileşimi kritik unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır.

Kapsülleyici malzeme çeşidinin panel performansı üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için polimer ile nem difüzyonu arasındaki ilişkinin anlaşılması gerekmektedir. Literatüre göre, bu konuda iki teori bulunmaktadır. İlki, suyun polimerle hidrojen bağları aracılığıyla veya serbest hacimde bağlanarak emildiğini öne sürerken; ikincisi, polimer yapısı içinde hidrojen bağlı kümeler aracılığıyla gerçekleştiğini öne sürmektedir. Bunun yanında, polimerler ve nem arasındaki ilişkiyi yorumlamak, polimerin kimyasal yapısı, kristallik oranı, polarite, serbest hacim ve çapraz bağlanma derecesi gibi parametrelere de bağlıdır [82], [83], [128]. **Tablo 3.4**'te verilen polimer özelliklerine dayanarak bazı çıkarımlar yapmak mümkün olmaktadır.

Tablo 3.4: Polimer özellikleri.

Polimer	Polimer Sınıfı	Çapraz bağ	Yan ürün	Polarite	WVTR (g·m ⁻² ·day ⁻¹)
EVA	Elastomer	Var	Asetik asit	Polar	34
ION	Termoplastik	Yok	Yok	Polar	0.19
POE	Elastomer	Var	Yok	Apolar	3.30
TPO	Termoplastik elastomer	Yok	Yok	Apolar	2.85

Su, polar bir yapıya sahiptir. Polimerin de polar yapıya sahip olması aralarındaki kimyasal etkileşimi kolaylaştıracaktır. **Tablo 3.4** incelendiğinde kullanılan polimerler arasında EVA ve ION polimerinin polar yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda EVA ve ION polimerlerinde nem ile etkileşiminin diğer polimerlere göre daha kolay gerçekleşmesi beklenir. EVA paneli için sonuçlar göz önüne alındığında test sonunda güçte büyük oranda düşüş meydana gelmesi bu çıkarımla tutarlı görünmektedir; ancak, bu durum ION polimeri için geçerli değildir. Burada önemli olan diğer parametre suyun polimer içinde iletim hızıdır. EVA polimeri en yüksek WVTR değerine sahipken, ION polimeri, en düşük WVTR değeri ile dikkat çekmektedir. Bu nedenle ION polimeri polar yapısına rağmen nem geçirgenliği düşük olduğu için nemin etkilerinden EVA polimeri kadar etkilenmemiştir. Ayrıca, POE ve TPO polimerlerinin de WVTR değerleri EVA polimerine kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, kullanılan alternatif polimerlerin nemin etkisine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermekte ve panellerin performansı üzerinde daha olumlu sonuç vermesini açıklamaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, bulguların genel olarak birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir. ION, POE ve TPO polimerleri asetik asit içermemeleri ve termal stabilite açısından daha iyi performansa sahip olmaları nedeniyle EVA yerine kullanılabilecek potansiyel polimerler arasında öne çıkmaktadır. Yapısal olarak incelendiğinde POE ve TPO polietilen bazlı kopolimerlerdir. İçerdikleri yan gruplar nedeniyle ve eklenen katkılandırma maddeleri ve çapraz bağlayıcı maddeler (peroksitler) ile farklılık göstermektedirler. POE polimeri kimyasal çapraz bağlanma gösterirken, TPO fiziksel bağlanma yapmaktadır. Aralarında yapısal farklılıklar olsa da performans açısından her iki polimerin de benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. ION polimeri ise etilen ve doymamış karboksilik asit kopolimerine dayanan ve TPO gibi kimyasal çapraz bağlanma yapmayan polimerlerdendir. Performans açısından bakıldığında ise ION polimeri EVA polimerine kıyasla daha stabil sonuç vermiştir.

Barretta ve diğerleri [83] çalışmalarında, POE ve TPO polimerlerinin DH testi altında davranışlarını incelenmiş ve EVA polimeri ile karşılaştırmışlardır. DH testi sonrasında polimerlerde önemli yapısal değişiklikler gözlemlenmemiştir ve içerdikleri katkı maddelerinin genel olarak korunduğu görülmüştür. DH testinin her iki polimer üzerinde etkileri benzer bulunmuştur ve EVA polimerine kıyasla daha iyi performans gösterdikleri belirlenmiştir. Benzer şekilde, Oreski ve diğerleri [74] çalışmalarında, EVA, POE ve TPO polimerlerini DH testi altında incelemişlerdir. İlk aşamada, polimerlerin kimyasal, optiksel, termal ve termo-mekanik özellikleri belirlenmiş ve bunların panel laminasyonu ve performansı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. İkinci aşamada, polimerik filmlerin uzun vadeli davranışlarının araştırılmasına olanak sağlayacak test panelleri üretilmiştir. TPO, termo-mekanik davranış açısından en kararlı davranışı gösterirken; EVA en yüksek termal genleşmeye sahip ve en az kararlı polimer olmuştur. POE, daha yüksek yüksek ergime sıcaklığına sahip olması dışında, genel olarak EVA ile benzer termal ve termo-mekanik özellikler göstermiştir. Test sonrasında en az performans kaybı TPO polimeri ile hazırlanan panelde gözlemlenmiştir. Tüm panellerde sararma problemi görülmüş ve bu sararmaların sebebi olarak polimerlerin içerdikleri katkı maddelerinin bozulması gösterilmiştir. Renk değişimlerinin, panel performansı üzerinde önemli bir etkisi olmadığından büyük bir hata olarak değerlendirilmemiştir. POE ve TPO polimerleri ile hazırlanan panellerin korozyon direnci yüksek bulunmuştur. EVA panelleri ise korozyona uğramış ve bu durum performans kaybına neden olmuştur.

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en fazla performans kaybının EVA polimeri ile hazırlanan panellerde meydana geldiği açıkça görülmektedir. EVA polimerinin polar ve düşük kristalli yapısı ve ayrıca yüksek WVTR değerine sahip olması nem ile etkileşiminin daha kolay olmasını sağlamaktadır. Nemin neden olduğu hidroliz reaksiyonları sonrasında EVA polimerinde hücre metalizasyonu korozyonunu hızlandırıcı etkili olduğu bilinen asetik asit oluşumu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, diğer panellere kıyasla performans kaybının daha yüksek olduğu söylenebilir. ION, POE ve TPO polimerleri ile hazırlanan paneller ise birbirine çok benzer sonuçlar vermektedir ve aralarında performans kaybı açısından çok büyük farklar görülmemiştir. Ayrıca, netSEM kullanılarak elde edilen mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkileri dikkate alındığında bu polimerler ile hazırlanan panellerin aynı bozulma yollarına sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığı zaman, bulguların oldukça tutarlı oldukları görülmektedir. Literatürde nemli ısı test koşullarından en çok etkilenen ve yapısı bozulan polimer EVA olarak belirlenmiştir. POE ve TPO polimerleri için ise belirgin bir bozulma mekanizması ortaya konmamıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da bu çıkarımları desteklemektedir. Elektriksel parametreler ve güçteki son durumlar karşılaştırıldığı zaman sızdırmazlık bandı kullanılmadığı durumda EVA paneli en fazla performans kaybı yaşayan panel olarak belirlenmiştir. Sızdırmazlık bandı uygulaması genel olarak panellerin performans kaybında iyileştirme sağlamıştır. Bu iyileştirme en fazla EVA panelinde görülmüştür. ION, POE ve TPO panellerinde ise sızdırmazlık bandının performans kaybına katkısı küçük ve orta ölçekli şekilde görülmüştür. EVA panelinde sızdırmazlık bandı kullanılmadığı takdirde meydana gelen performans kaybının, nemin panel içerisine difüzyonundan, polimerin nem ile etkileşiminden, asetik asit oluşumundan, asetik asidin panel içinde birikerek korozyon reaksiyonlarını hızlandırdığından kaynaklandığı söylenebilir. ION, POE ve TPO panellerinin ise nem ve sıcaklık altında yapılarında asetik asit gibi yan ürün oluşturmamaları ve düşük nem geçirgenliğine sahip olmaları nedeniyle EVA paneline kıyasla daha yüksek performans sergiledikleri görülmektedir. Bu polimerlerin nem ile etkileşimleri düşük olsa bile nemin panel içine difüzyonu küçük düzeyde korozyona neden olabilir. Bu panellerde az da meydana gelen performans kaybının nedeni olarak gösterilebilir. Ayrıca, yapılarında kullanılan katkı maddelerinin ve stabilizatörlerin azalması ya da termal stresler nedeniyle katmanlar arası yapışma kabiliyetlerinin azalması da önemli faktörler olarak belirlenebilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EVA polimerine alternatif olarak belirlenen ION, POE ve TPO polimerleri kullanılarak üretilen fotovoltaik panellerin nemli ısı testi altındaki performansları incelenmiştir. Yaşlandırma testleri sonucunda elde edilen veriler ve deneysel kinetik model kullanılarak panellerin degradasyon davranışları analiz edilmiştir. Panellerin bozulma aktivasyon enerjileri ve hata süreleri tahmin edilmiş ve Boltzmann büyüme fonksiyonu modeli kullanılarak bu çıkarımlar desteklenmiştir. ION, POE ve TPO polimerleri ile kapsüllenen paneller incelendiğinde, EVA polimeri ile kapsüllenen paneldeki gibi performans kaybı söz konusu olmamıştır. Sızdırmazlık bandı uygulanan EVA panelinin performansında önemli bir iyileşme olduğu görülmüştür. Bu durum, nem girişinin önlenmesinin hidroliz reaksiyonlarını ve asetik asit oluşumunu azaltacağı için EVA polimerinin bozulması ve panel performansı üzerinde büyük bir olumlu etkiye sahip olacağını vurgulamaktadır. POE ve TPO panellerinde sızdırmazlık bandı uygulamasının avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bozulma mekanizmalarını daha detaylı incelemek adına yapılan I-V ölçümlerinden P_{MP} , I_{SC} , R_s ve FF parametreleri alınmıştır. netSEM modeli kullanılarak, bu parametreler arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiş ve performans kaybına neden olan potansiyel faktörler belirlenmiştir. Genellikle, panel gücündeki azalmalar, hücre seri direncindeki artışla ilişkilendirilmiştir ve bu seri direnç artışının, FF değerinin azalmasına neden olduğu bulunmuştur.

Analiz ve modelleme çalışmaları neticesinde elde edilen bulguların desteklenmesi için kapsülleyici olarak kullanılan polimerik filmlerin fiziksel, kimyasal, optiksel, termal ve termo-kimyasal özelliklerinin belirlenmesi gelecek çalışma olarak önerilebilir. Bu sayede, uygulanan nemli ısı yaşlandırma test koşulları altında polimerik malzemelerin davranışları incelenerek bozulma mekanizmaları ve panel performansına olan etkileri daha detaylı araştırılabilir. Aynı şekilde, nemli donma veya UV ışık gibi farklı test koşulları altında yaşlandırma testlerinin uygulanması da önerilebilir. Ayrıca, EVA yerine kullanılacak olan ve daha iyi performans gösteren bu malzemelerin panellerin kullanım ömrüne olan etkisi de incelenebilir. Bu malzemeler, EVA polimerine kıyasla daha maliyetli oldukları için ve yapıları ve üretim süreçleri farklı olduğu için gerçekleştirilecek seviyelendirilmiş elektrik maliyet analizi ve yaşam döngü analizi ile ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirmeleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review", *Environ. Chem. Lett.* **2023**, 21, 741-764.
- [2] Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A., "A review on solar energy use in industries", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2011**, 15, 1777-1790.
- [3] Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., "Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2022**, 159, 112160.
- [4] Hassan, Q., Viktor, P.J., Al-Musawi, T., "The renewable energy role in the global energy Transformations", *Renew. Energy. Focus.* **2024**, 48, 100545.
- [5] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., Kothari, S., "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2011**, 15, 1513-1524.
- [6] Sattar, M. A., Sameeroddin, M., Sami, M. A., "Renewable Energy and its Industrial Applications", **2020**, 07.
- [7] Kalogirou, S. A., "Solar thermal collectors and applications", *Prog. Energy. Combust. Sci.* **2004**, 30, 231-295.
- [8] Kalogirou, S. A., "*Solar Energy Engineering: Processes and Systems*", Elsevier, **2023**.
- [9] E. B. M., "Memoire sur les Effets Electriques Produits sous l’Influence des Rayons Solaires", *Comptes. Rendus. Hebd. Seances. Acad. Sci.* **1839**, 9, 561-567.
- [10] Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L., "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *J. Appl. Phys.* **1954**, 25, 676-677.
- [11] Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., Selvaraj, J. A., "Progress in solar PV technology: Research and achievement", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2013**, 20, 443-461.
- [12] Andersson, Björn, A., "Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics", *Progress in photovoltaics: research and applications*, **2000**, 61-76.
- [13] Web 1, (2024), www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html, (Erişim Tarihi: 26/05/2024).
- [14] Yang, E. H., French, R. H., Bruckman, L. S., "*Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules*", Elsevier, **2019**.

- [15] Web 2, (2024), www.viridiansolar.co.uk/resources-4-1-photovoltaic-effect.html, (Erişim Tarihi: 31/05/2024).
- [16] Web 3, (2024), www.imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html, (Erişim Tarihi: 13/06/2024).
- [17] Diffey, B. L., "Sources and measurement of ultraviolet radiation", *Methods*, **2002**, 28, 4-13.
- [18] Su, L. T., Karuturi, S. K., Luo, J., "Photon Upconversion in Hetero-nanostructured Photoanodes for Enhanced Near-Infrared Light Harvesting", *Adv. Mater.* **2013**, 25, 1603-1607.
- [19] Grifoni, F., Bonomo, M., Naim, W., "Toward Sustainable, Colorless, and Transparent Photovoltaics: State of the Art and Perspectives for the Development of Selective Near-Infrared Dye-Sensitized Solar Cells", *Adv. Energy. Mater.* **2021**, 11, 2101598.
- [20] Yu, R., Lin, Q., Leung, S-F., Fan, Z., "Nanomaterials and Nanostructures for Efficient Light Absorption and Photovoltaics", *Nano Energy*, **2012**, 1 (1), 57-72.
- [21] Onar, O. C., Khaligh, A., "Energy Sources. In: Rashid MH, ed. *Alternative Energy in Power Electronics*", Butterworth-Heinemann, **2015**, 81-154.
- [22] Acharyya, S., Sadhukhan, S., Panda, T., "Dopant-free materials for carrier-selective passivating contact solar cells: A review", *Surf. Interfaces.* **2022**, 28, 101687.
- [23] Pan, A., Zhu, X., "12 - Optoelectronic properties of semiconductor nanowires. In: Arbiol J, Xiong Q, eds. *Semiconductor Nanowires*. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials", Woodhead Publishing, **2015**, 327-363.
- [24] Rappaport, P., "The photovoltaic effect and its utilization", *Sol. Energy.* **1959**, 3, 8-18.
- [25] Cao, L. C. T., Hakim, L., Hsu, S. H., "Boron Doping in Next-Generation Materials for Semiconductor Device In: *Characteristics and Applications of Boron*", IntechOpen, **2022**.
- [26] Web 4, (2024), www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping/, (Erişim Tarihi: 13/06/2024).
- [27] Web 5, (2024), www.maysunsolar.com/blog-what-are-the-main-components-of-solar-panels/, (Erişim Tarihi: 31/05/2024).
- [28] Czanderna, A. W., Pern, F. J., "Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells.* **1996**, 43, 101-181
- [29] Arndt, Regan, Robert P., "Basic understanding of IEC standard testing for photovoltaic panels", *TÜV. SÜD. Prod. Serv.* **2010**.

- [30] Wohlgemuth J. H., Kurtz S., (2011), "Using accelerated testing to predict module reliability", *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA:IEEE, 003601-003605.
- [31] Osterwald, C. R., McMahon, T. J., "History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **2009**, 17, 11-33.
- [32] Bora, B., Rai, S., Dhar, A., Banerjee, C., "Effect of UV irradiation on PV modules and their simulation in newly designed site-specific accelerated ageing tests", *Sol. Energy.* **2023**, 253, 309-320.
- [33] Ebhota, W. S., Tabakov, P. Y., "Influence of photovoltaic cell technologies and elevated temperature on photovoltaic system performance", *Ain. Shams. Eng. J.* **2023**, 14, 101984.
- [34] Web 6, (2024), www.arka360.com/ros/heat-temperature-on-photovoltaic-modules/, (Erişim Tarihi: 28/05/2024).
- [35] Segbefia, O. K., (2023), "Solar cell degradation : the role of moisture ingress", Doktora Tezi, Agder Üniversitesi.
- [36] Chaudhary, T. N., Maka, A. O. M., Saleem, M. W., Ahmed, N., Rehman, M. U., Azeem, M. U., "Experimental and Performance Evaluation of the Soiling and Cooling Effect on the Solar Photovoltaic Modules", *Arab. J. Sci. Eng.* **2024**, 49, 1421-1432.
- [37] Oreski, G., Ottersböck, B., Omazic, A., "6 - Degradation Processes and Mechanisms of Encapsulants. In: Yang H.E., French R.H., Bruckman L.S., eds. *Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules*", *Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, **2019**, 135-152.
- [38] Morlier, A., Klotz, S., Sczuka, S., "Influence of the curing state of ethylene-vinyl acetate on photovoltaic modules aging. *Proc 28th EU PVSEC*", Published online January 1, **2013**, 2832-2837.
- [39] Jonai, S., Hara, K., Tsutsui, Y., Nakahama, H., Masuda, A., "Relationship between cross-linking conditions of ethylene vinyl acetate and potential induced degradation for crystalline silicon photovoltaic modules", *Jpn. J. Appl. Phys.* **2015**, 54, 08KG01.
- [40] Oreski, G., Rauschenbach, A., Hirschl, C., Kraft, M., Eder, G., Pinter, G., "Crosslinking and post-crosslinking of ethylene vinyl acetate in photovoltaic modules", *J. Appl. Polym. Sci.* **2017**, 134.
- [41] Schneller, E. J., Brooker, R. P., Shiradkar, N. S., "Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III: Module manufacturing", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2016**, 59, 992-1016.

- [42] Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., "Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules: IEA PVPS Task 13: External Final Report IEA-PVPS", International Energy Agency, **2014**.
- [43] Luo, W., Khoo, Y. S., Hacke, P., "Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review", *Energy. Environ. Sci.* **2017**, 10, 43-68.
- [44] Köntges, M., Oreski, G., Jahn, U., Herz, M., Hacke, P., Weiß, K. A., "Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3: Report IEA-PVPS T13-09:2017", International Energy Agency, **2017**.
- [45] Park, N. C., Jeong, J. S., Kang, B. J., Kim, D. H., "The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module", *Microelectron. Reliab.* **2013**, 53, 1818-1822.
- [46] Kim, T. H., Park, N. C., Kim, D. H., "The effect of moisture on the degradation mechanism of multi-crystalline silicon photovoltaic module", *Microelectron. Reliab.* **2013**, 53, 1823-1827.
- [47] Swonke T., Hoyer U., (2009), "Diffusion of Moisture and Impact of UV Irradiance in Photovoltaic Encapsulants", *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 4, 3374.
- [48] Jansen, K. W., Delahoy, A. E., A "Laboratory Technique for the Evaluation of Electrochemical Transparent Conductive Oxide Delamination from Glass Substrate", *Thin Solid Films*, **2003**, 432 (2), 153-160.
- [49] Durand, "Attaining Thirty-Year Photovoltaic System Lifetime", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **1994**.
- [50] Gabor A., Ralli M., Montminy S., (2006), "Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules", *Proc 21st Eur. Photovolt. Sol. Energy. Conf.* 1 January.
- [51] Reil, F., Althaus, J., Vaaßen, W., Herrmann, W., Strohkendl, K., (2010), "The effect of transportation impacts and dynamic load tests on the mechanical and electrical behaviour of crystalline PV modules", *25th European PV Solar Energy Conference*, 3989-3992.
- [52] Pingel S., Zemen Y. B., Frank O., Geipel T., Berghold J., (2009), "Mechanical Stability of Solar Cells within Solar Panels", *24th Eur. Photovolt. Energy. Conf.* 1 January.
- [53] Kim, N., Hwang, K. J., Kim, D., Lee, J. H., Jeong, S., Jeong, D. H., "Analysis and reproduction of snail trails on silver grid lines in crystalline silicon photovoltaic modules", *Solar. Energy*. 124, **2016**, 153-162.

- [54] Richter S., Werner M., Swatek S., Hagendorf C., (2012), "Understanding the snail trail effect in silicon solar modules on microstructural scale", *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 3439-3441.
- [55] Meyer, S., Timmel, S., Gläser, M., Braun, U., Wachtendorf, V., Hagendorf, C., "Polymer foil additives trigger the formation of snail trails in photovoltaic modules", *Solar energy materials and solar cells*, **2014**, 130, 64-70.
- [56] Chou, Y. H., Chou, W. Y., Shiu, S. M., "Chemical Analysis and Proposed Generating Mechanism for Snail Tracks Contamination of EVA Encapsulated Modules", **2012**.
- [57] Wu, Z., Lyu, S., Peng, Q., Han, H., Zhu, D., "Thermomechanical Stress Distribution Analysis of Junction Box on Silicon Photovoltaic Modules Based on Finite Element Analysis", *IEEE J Photovolt.* **2019**, 9, 1716-1720.
- [58] Al Mahdi, H., Leahy, P. G., Alghoul, M., Morrison, A. P., "A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques", *Solar*. **2024**, 4, 43-82.
- [59] Golive, Y. R., Zachariah, S., Bhaduri, S., "All-India Survey of Photovoltaic Module Reliability: 2018", **2018**.
- [60] Lee, Y. J., Kim, B. S., Ifitiquar, S., Park, C., Yi, J., "Silicon solar cells: Past, present and the future", *J. Korean. Phys. Soc.* **2014**, 65, 355-361.
- [61] Ushasree, P. M., Bora, B., "Silicon Solar Cells", **2019**.
- [62] Maalouf, A., Okoroafor, T., Jehl, Z., Babu, V., Resalati, S., "A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems", *Renew. Sustain. Energy. Rev.* **2023**, 186, 113652.
- [63] Bati, A. S. R., Zhong, Y. L., Burn, P. L., Nazeeruddin, M. K., Shaw, P. E., Batmunkh, M., "Next-generation applications for integrated perovskite solar cells", *Commun. Mater.* **2023**, 4, 1-24.
- [64] Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., "Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells.* **2019**, 192, 123-133.
- [65] Kılıç, F. Ç., "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri", *Mühendis ve Makine*, **2015**, 56, 28-40.
- [66] Geretschlager, K., Wallner, G., Fischer, J., "Structure and basic properties of photovoltaic module backsheet films", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells.* **2016**, 144, 451-456.
- [67] Jiang, S., Wang, K., Zhang, H., Ding, Y., Yu, Q., "Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant", *Macromol. React. Eng.* **2015**, 9, 522-529.

- [68] Mickiewicz R., Li B., Doble D. M. J., (2011), "Effect of Encapsulation Modulus on the Response of PV Modules to Mechanical Stress", *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 5, 6307.
- [69] Matsuda, K., Watanabe, T., Sakaguchi, K., Yoshikawa, M., Doi, T., Masuda, A., "Microscopic Degradation Mechanisms in Silicon Photovoltaic Module under Long-Term Environmental Exposure", *Jpn. J. Appl. Phys.* **2012**, 51.
- [70] Weber U., Eiden R., Strubel C., (2012), "Acetic Acid Production, Migration and Corrosion Effects in Ethylene-Vinyl-Acetate- (EVA-) Based PV Modules", *27th Eur. Photovolt. Sol. Energy. Conf.* 1 January.
- [71] Peike, C., Hädrich, I., Weiß, K. A., Dürr, I., Ise, F., "Overview of PV module encapsulation materials", *Photovolt. Int.* **2013**, 19, 85-92.
- [72] Web 7, (2024), www.sinovoltaics.com/learning-center/materials/ionomer-encapsulants/, (Erişim Tarihi: 01.06.2024).
- [73] McNeill, Ian, C., Angus, A., "Thermal degradation behaviour of acrylic salt polymers and ionomers", *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, **1998**, 157-172.
- [74] Oreski, G., Omazic, A., Eder, G. C., "Properties and degradation behaviour of polyolefin encapsulants for photovoltaic modules", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **2020**, 28, 1277-1288.
- [75] López-Escalante, M. C., Caballero, L. J., Martín, F., Gabás, M., Cuevas, A., Ramos-Barrado, J. R., "Polyolefin as PID-resistant encapsulant material in PV modules", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells.* **2016**, 144, 691-699.
- [76] Adothu, B., Costa, F. R., Mallick, S., "UV resilient thermoplastic polyolefin encapsulant for photovoltaic module encapsulation", *Polym. Degrad. Stab.* **2022**, 201, 109972.
- [77] Adothu, B., Bhatt, P., Chattopadhyay, S., "Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant—A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation", *Sol. Energy.* **2019**, 194, 581-588.
- [78] Adothu, B., Bhatt, P., Zele, S., Oderkerk, J., Costa, F. R., Mallick, S., "Investigation of newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant principle properties for the c-Si PV module application", *Mater. Chem. Phys.* **2020**, 243, 122660.
- [79] Kaaya, I., Koehl, M., Mehilli, A. P., De Cardona Mariano, S., Weiss, K. A., "Modeling Outdoor Service Lifetime Prediction of PV Modules: Effects of Combined Climatic Stressors on PV Module Power Degradation", *IEEE J. Photovolt.* **2019**, 9, 1105-1112.
- [80] Koehl, M., Hoffmann, S., Wiesmeier, S., "Evaluation of damp-heat testing of photovoltaic modules: Evaluation of damp-heat testing of photovoltaic modules", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **2017**, 25, 175-183.

- [81] Adothu, B., Costa, F. R., Mallick, S., "Damp heat resilient thermoplastic polyolefin encapsulant for photovoltaic module encapsulation", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells*. **2021**, 224, 111024.
- [82] Dintcheva, N. T., Morici, E., Colletti, C., "Encapsulant Materials and Their Adoption in Photovoltaic Modules: A Brief Review", *Sustainability*. **2023**, 15, 9453.
- [83] Barretta, C., Oreski, G., Feldbacher, S., Resch-Fauster, K., Pantani, R., "Comparison of Degradation Behavior of Newly Developed Encapsulation Materials for Photovoltaic Applications under Different Artificial Ageing Tests", *Polymers*, **2021**, 13, 271.
- [84] Baiamonte, M., Colletti, C., Ragonesi, A., Gerardi, C., Dintcheva, N. T., "Durability and Performance of Encapsulant Films for Bifacial Heterojunction Photovoltaic Modules", *Polymers*, **2022**, 14, 1052.
- [85] Bai, Y., Zhao, Y., Li, J., "Lower Levelized Cost of Energy Achievement of Silicon Heterojunction Solar Modules with Low Water Vapor Transmission Rate Encapsulants", *Energy. Technol.* **2023**, 11, 2201466.
- [86] Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., Flaminio, G., Pellegrino, M., "New PV encapsulants: assessment of change in optical and thermal properties and chemical degradation after UV aging", *Polym. Degrad. Stab.* **2024**, 220, 110643.
- [87] Tiefenthaler M., Wallner G. M., Pugstaller R., (2023), "The Effects of Global Damp Heat Ageing on Debonding of Polyolefin Glass Laminates", *IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 1-3.
- [88] Kumar A., Pavgi A., Hacke P., Choudhury K. R., TamizhMani G., (2022), "Extended Accelerated Stress Testing (EAST) of Glass/Glass, Glass/Backsheet and Glass/Transparent Backsheet PV Modules: Influence of EVA and POE Encapsulants", *IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*, 1065-1067.
- [89] Cattaneo G., Levrat J., Li H., (2020), "Encapsulant Materials for High Reliable Bifacial Heterojunction Glass/Glass Photovoltaic Modules", *47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 1056-1061.
- [90] Kempe M. D., Wohlgemuth J. H., (2013), "Evaluation of temperature and humidity on PV module component degradation", *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 0120-0125.
- [91] Web 8, (2024), www.dr-hwc.com/en/blogs/the-significance-of-damp-heat-testing-for-solar-modules, (Erişim Tarihi: 14/05/2024).
- [92] Duran, E., Piliouline, M., Sidrach-de-Cardona, M., Gómez-Galán, J. A., Andujar Marquez, J., "Different Methods to Obtain the I–V Curve of PV Modules: A Review", **2008**, 6.

- [93] Web 9, (2024), www.pv-diagnostics.com/blog/iv-testing-and-its-significance, (Erişim Tarihi: 02/01/2024).
- [94] Sharma, D., Purohit, G., "Analysis of the Effect of Fill Factor on the Efficiency of Solar PV System for Improved Design of MPPT", **2014**.
- [95] Lasnier, F., Ang, T. G., Gan, Ang, T., "Photovoltaic Engineering Handbook", Adam Higler, **1990**.
- [96] Lindholm, Fossum, J. G., Burgess, E. L., "Application of the superposition principle to solar-cell analysis", *IEEE Trans. Electron. Devices*. **1979**, 26, 165-171.
- [97] King, D. L., "Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions", *AIP Conf. Proc.* **1997**, 394.
- [98] Meeker, W. Q., Escobar, L. A., "Pitfalls of accelerated testing", *IEEE Trans. Reliab.* **1998**, 47, 114-118.
- [99] Koehl, M., Heck, M., Wiesmeier, S., "Modelling of conditions for accelerated lifetime testing of Humidity impact on PV-modules based on monitoring of climatic data", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells*. **2012**, 99, 282-291.
- [100] Escobar, L. A., Meeker, W. Q., "A Review of Accelerated Test Models", *Stat. Sci.* **2006**, 21, 552-577.
- [101] Lindig, Sascha, Kaaya, I., Weiß, K. A., Moser, D., Topic, M., "Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements", *IEEE Journal of Photovoltaics* 8, **2018**, 1773-1786.
- [102] Bucher, Christof, Wandel, J., Joss, D., "Life Expectancy of PV Inverters and Optimizers in Residential PV Systems", **2022**.
- [103] Reséndiz-Muñoz, J., Corona-Rivera, M. A., Fernández-Muñoz, J. L., Zapata-Torres, M., Márquez-Herrera, A., Ovando-Medina, V. M., "Mathematical model of Boltzmann's sigmoidal equation applicable to the set-up of the RF-magnetron co-sputtering in thin films deposition of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ", *Bulletin of Materials Science* 40, **2017**, 1043-1047.
- [104] Harrison, L., Friston, K. J., "Effective connectivity." *Statistical parametric mapping: the analysis of functional brain images*, **2007**, 508-521.
- [105] Wright, S., "Correlation and causation", *J. Agric. Res.* Published online **1921**, 557.
- [106] Wright, S., "On the Nature of Size Factors", *Genetics*. **1918**, 3, 367-374.
- [107] Wright, S., "The Relative Importance of Heredity and Environment in Determining the Piebald Pattern of Guinea-Pigs", *Proc. Natl. Acad. Sci.* **1920**, 6, 320-332.

- [108] Fan, Y., Chen, J., Shirkey, G., "Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: an updated review", *Ecol. Process.* **2016**, 5, 19.
- [109] Lee, S. Y., "Structural Equation Modeling: A Bayesian Approach", John Wiley & Sons, **2007**.
- [110] Neuberger, L. G., "Causality: models, reasoning, and inference, by judea pearl, cambridge university press", *Econometric Theory*, **2003**, 19, 675-685.
- [111] Brown, T. A., "Confirmatory Factor Analysis for Applied Research, Second Edition", Guilford Publications, **2015**.
- [112] Harrington, D., "Confirmatory Factor Analysis", Oxford University Press, **2009**.
- [113] Dursun, Y., Kocagöz, E., "Yapısal Eşitlik Modellemesi ve Regresyon: Karşılaştırmalı Bir Analiz", *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim Fakültesi Derg.* **2010**, 35, 1.
- [114] Ye, J., Chen, J., Bai, H., Yue, Y., "Analyzing transfer commuting attitudes using a market segmentation approach", *Sustainability*, **2018**, 2194.
- [115] Alkış, N., "Bayes Yapısal Eşitlik Modellemesi: Kavramlar ve Genel Bakış", *Gazi İktisat ve İşletme Derg.*, **2016**, 2, 105-116.
- [116] Byrne, B. M., "Structural Equation Modeling with Mplus: Basic Concepts, Applications, and Programming", Routledge, **2011**.
- [117] Kline, R. B., "Principles and Practice of Structural Equation Modeling", Guilford Publications, **2023**.
- [118] Web 10, (2024), www.rdocumentation.org/packages/netSEM/topics/netSEMm, (Erişim Tarihi: 21/05/2024).
- [119] Web 11, (2023), www.cran.r-project.org/web/packages/netSEM/index.html, (Erişim Tarihi: 26/12/2023).
- [120] Web 12, (2024), www.mds-rely.org/august-featured-project-netsem-modeling-for-service-life-prediction-of-polymers/, (Erişim Tarihi: 21/05/2024).
- [121] Bruckman, L., Wheeler, N., Ma J., "Statistical and Domain Analytics Applied to PV Module Lifetime and Degradation Science", *IEEE Access.* **2013**, 1, 384-403.
- [122] Gok, A., Fagerholm, C. L., French, R. H., Bruckman, L. S., "Temporal evolution and pathway models of poly(ethylene-terephthalate) degradation under multi-factor accelerated weathering exposures", *PLoS One.* **2019**, 14, e0212258.
- [123] Gareth, J., Daniela, W., Trevor, H., Robert, T. "An introduction to statistical learning: with applications in R", Springer, **2013**.

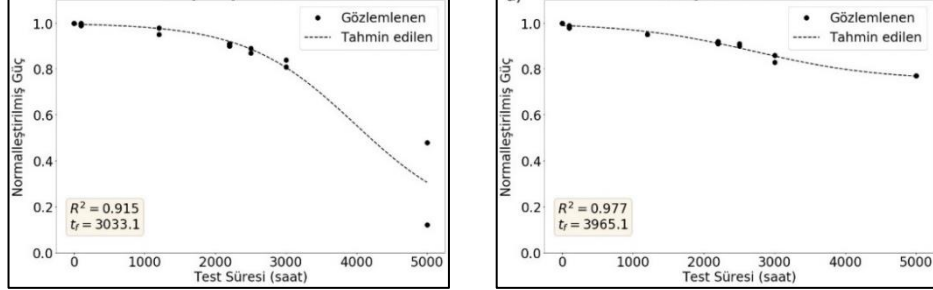
- [124] Kempe M. D., Dameron A. A., Moricone T. J., Reese M. O., (2010), "Evaluation and modeling of edge-seal materials for photovoltaic applications", *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, USA:IEEE, 000256-000261.
- [125] Web 13, (2023), www.sinovoltaics.com/learning-center/materials/pib-edge-sealant/, (Erişim Tarihi: 26/12/2023).
- [126] Perret-Aebi, L. E., Li, H. Y., Theron, R., "Insights on EVA lamination process: Where do the bubbles come from?", Published online, **2010**.
- [127] Rajput, P., Tiwari, G., Sastry, O., Bora, B., Sharma, V., "Degradation of mono-crystalline photovoltaic modules after 22 years of outdoor exposure in the composite climate of India", *Sol. Energy*. **2016**, 135, 786-795.
- [128] Yang, M., Schäffler, R., Repmann, T., Orgassa, K., "Moisture Absorption and Desorption in an Ionomer-Based Encapsulant: A Type of Self-Breathing Encapsulant for CIGS Thin-Film PV Modules", *Engineering*. **2020**, 6, 1403-1407.

ÖZGEÇMİŞ

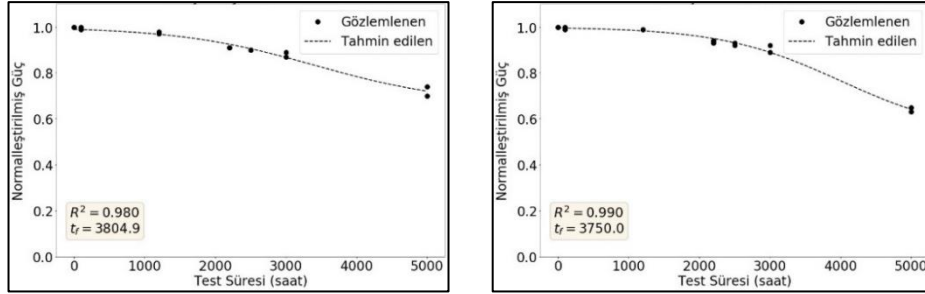
Melikenur Genç, lisans eğitimini Gebze Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği bölümünde 2017-2022 yılları arasında tamamladı. Ardından 2022 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Şu anda özel bir şirkette Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

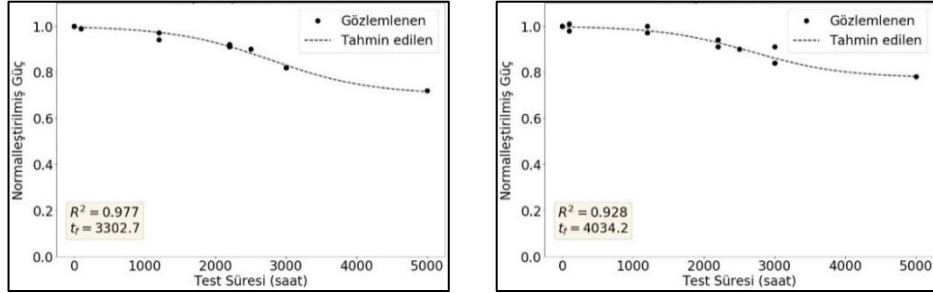
Ek-A: Boltzmann Büyüme Fonksiyonu Modeli



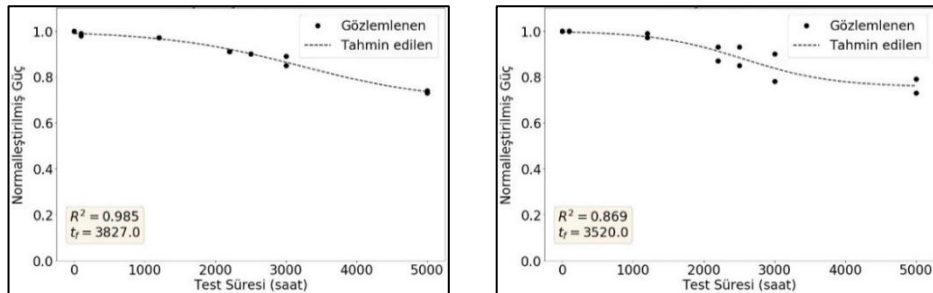
Şekil Ek-A.1: EVA (sol) ve EVA+SB (sağ) paneli.



Şekil Ek-A.2: ION (sol) ve ION+SB (sağ) paneli.

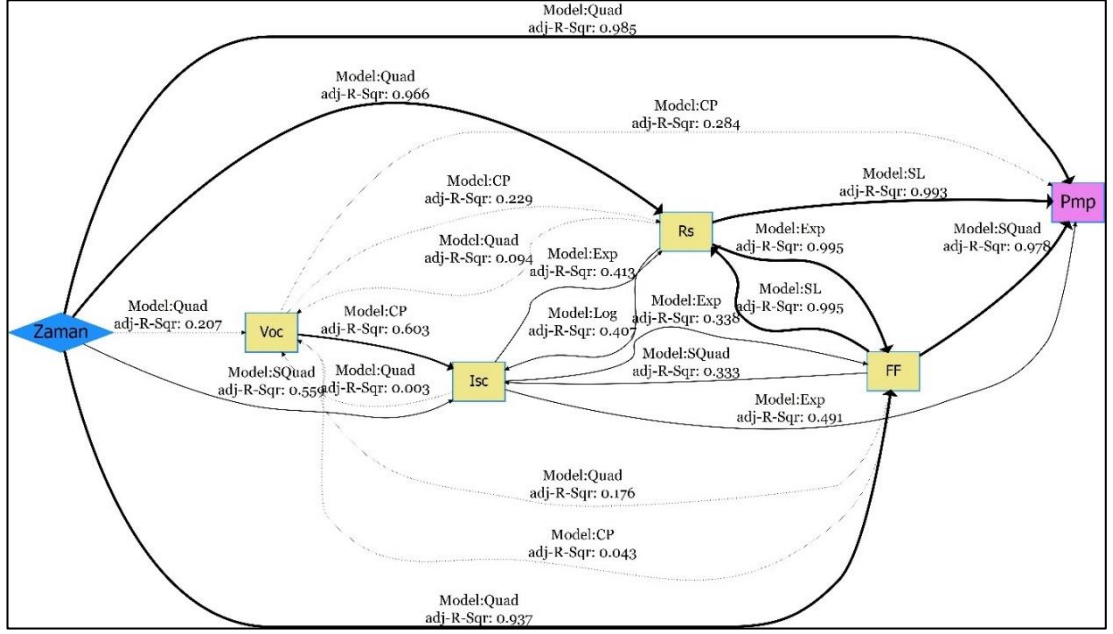


Şekil Ek-A.3: POE (sol) ve POE+SB (sağ) paneli.

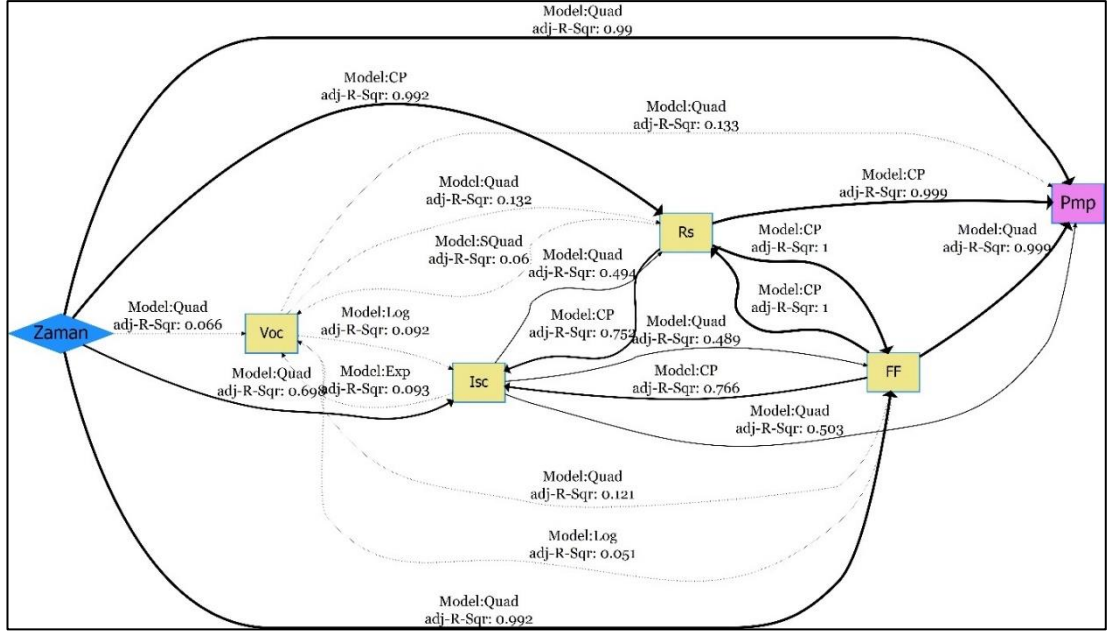


Şekil Ek-A.4: TPO (sol) ve TPO+SB (sağ) paneli.

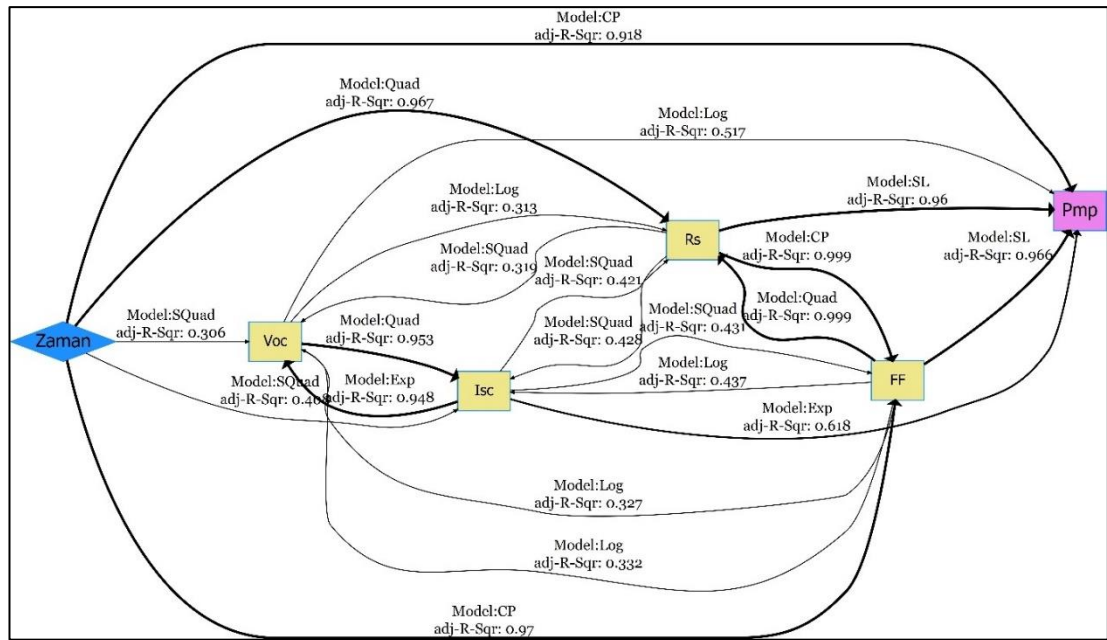
Ek-B: netSEM Diyagramları



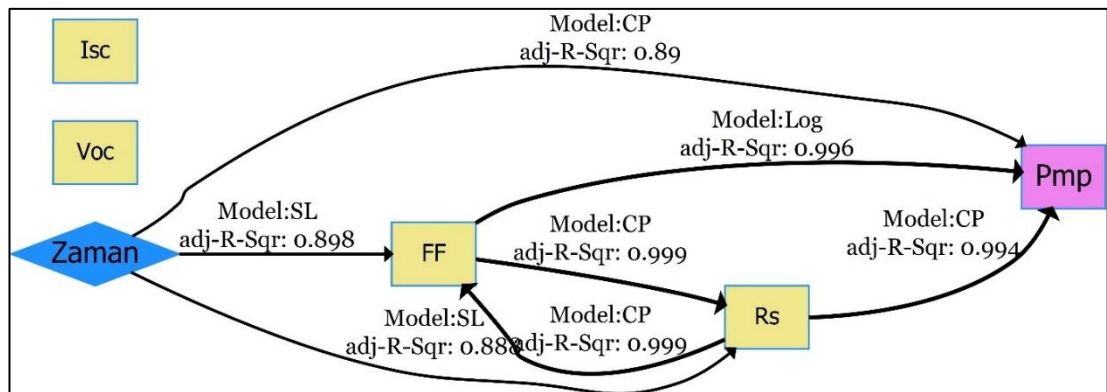
Şekil Ek-B.1: ION paneli için netSEM diyagramı.



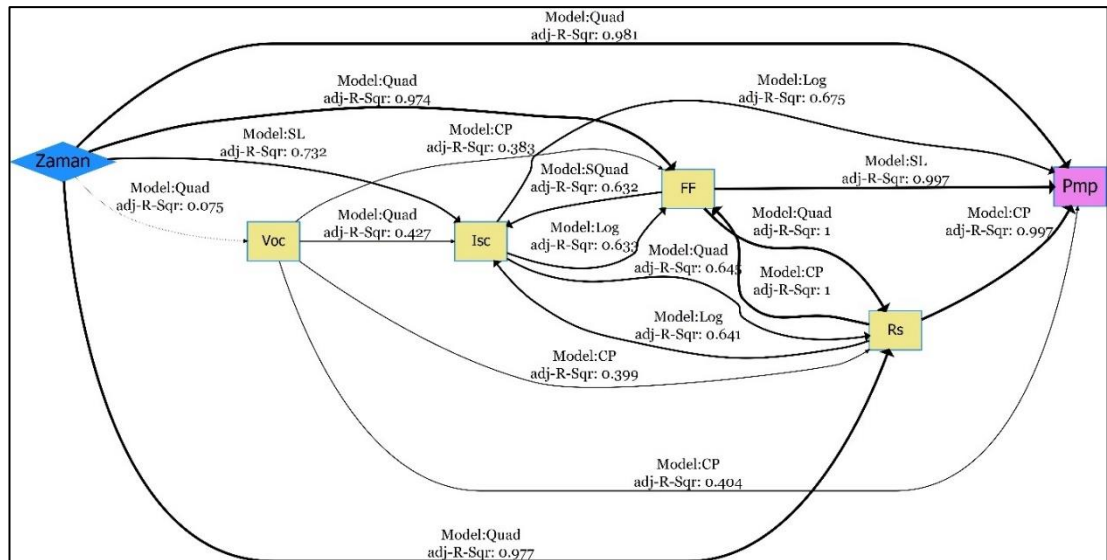
Şekil Ek-B.2: ION+SB paneli için netSEM diyagramı.



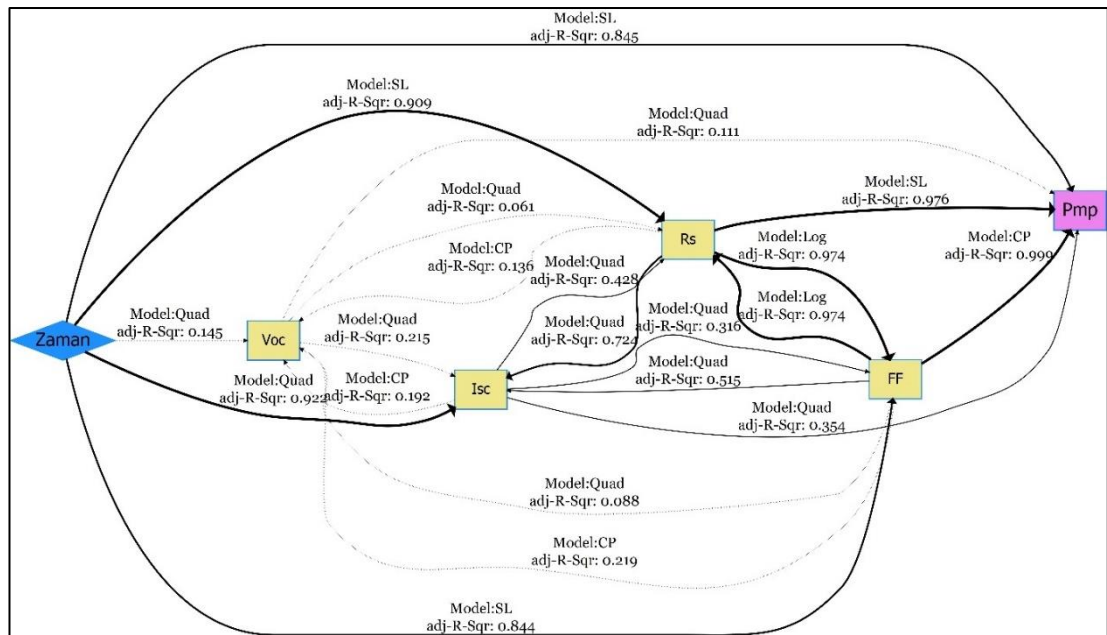
Şekil Ek-B.3: POE paneli için netSEM diyagramı.



Şekil Ek-B.4: POE+SB paneli için netSEM diyagramı.

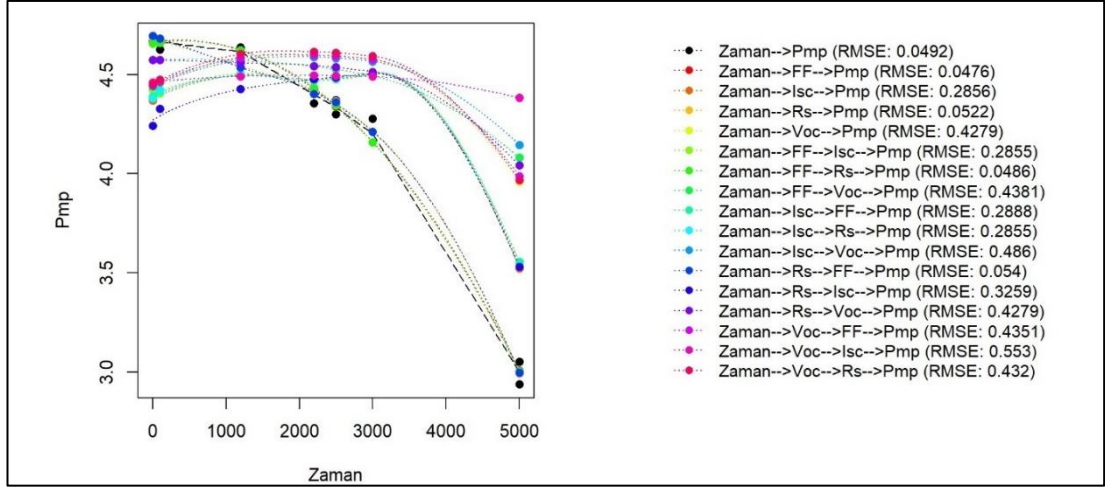


Şekil Ek-B.5: TPO paneli için netSEM diyagramı.

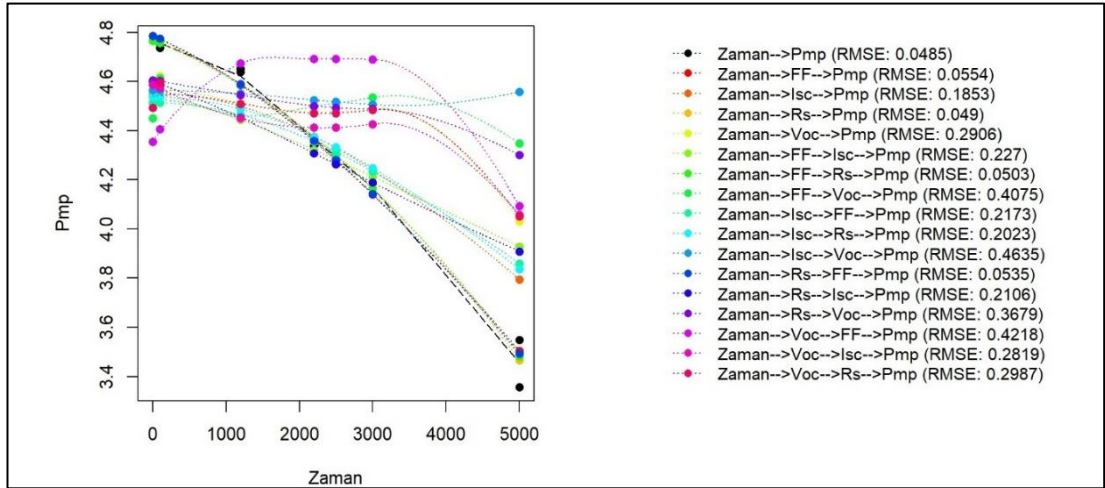


Şekil Ek-B.6: TPO+SB paneli için netSEM diyagramı.

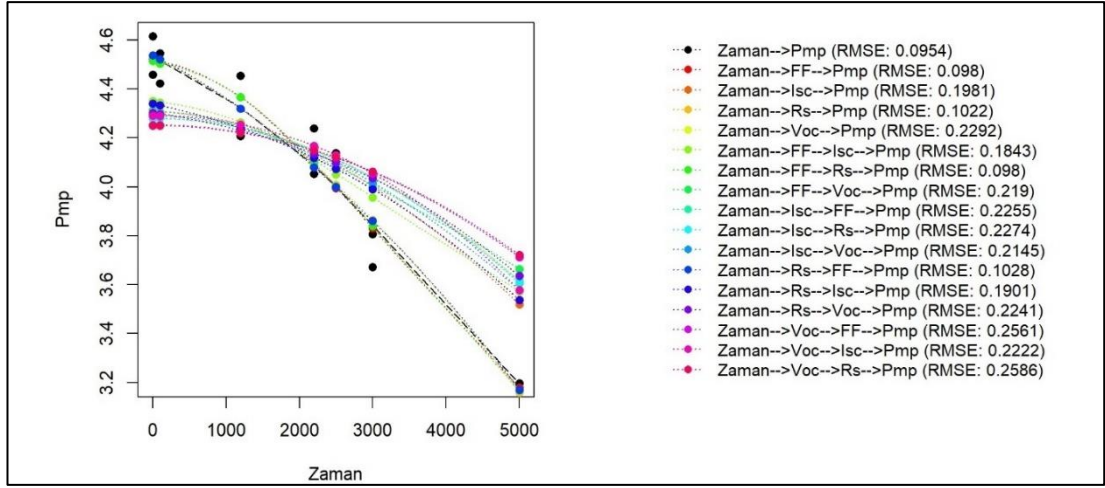
Ek-C: Mekanistik Değişkenlerin Güç ile İlişkisi



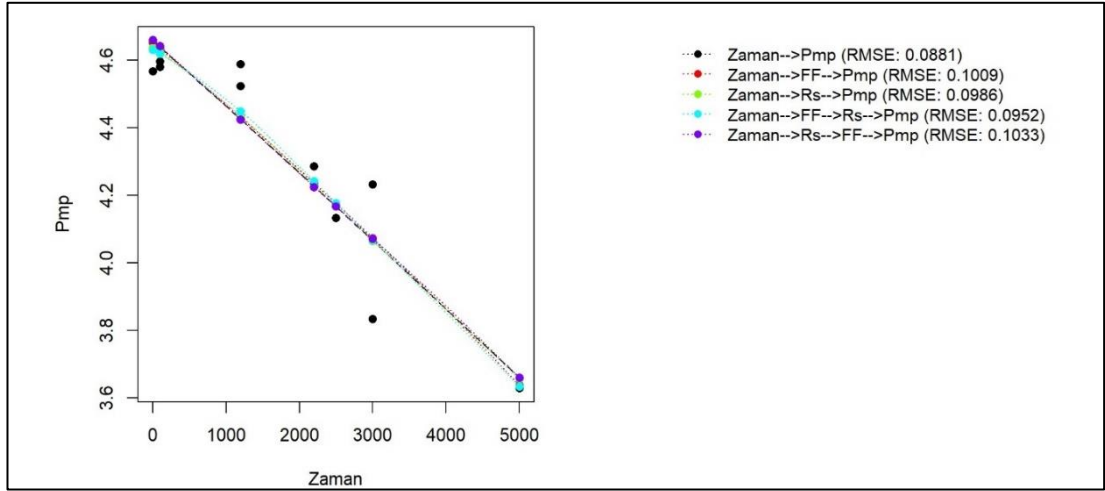
Şekil Ek-C.1: ION paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.



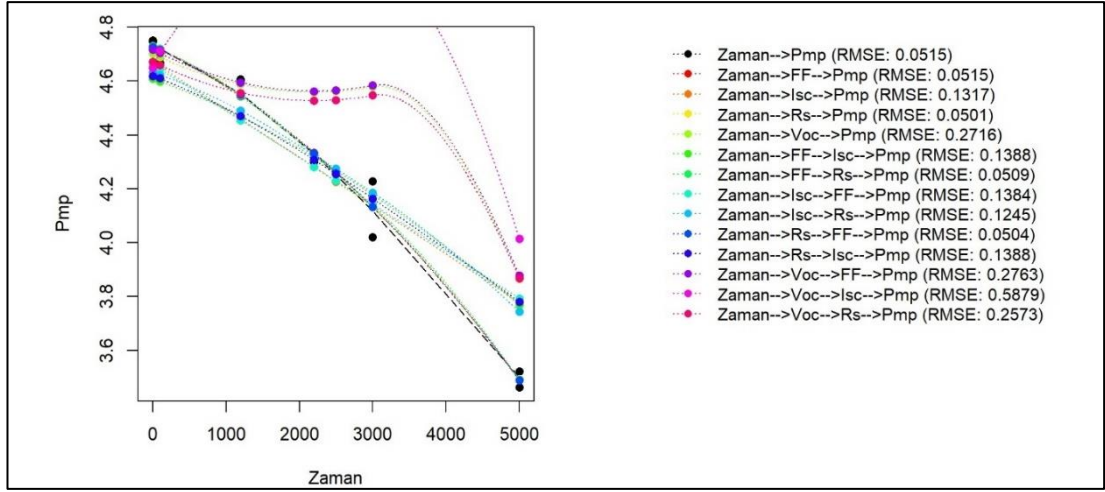
Şekil Ek-C.2: ION+SB paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.



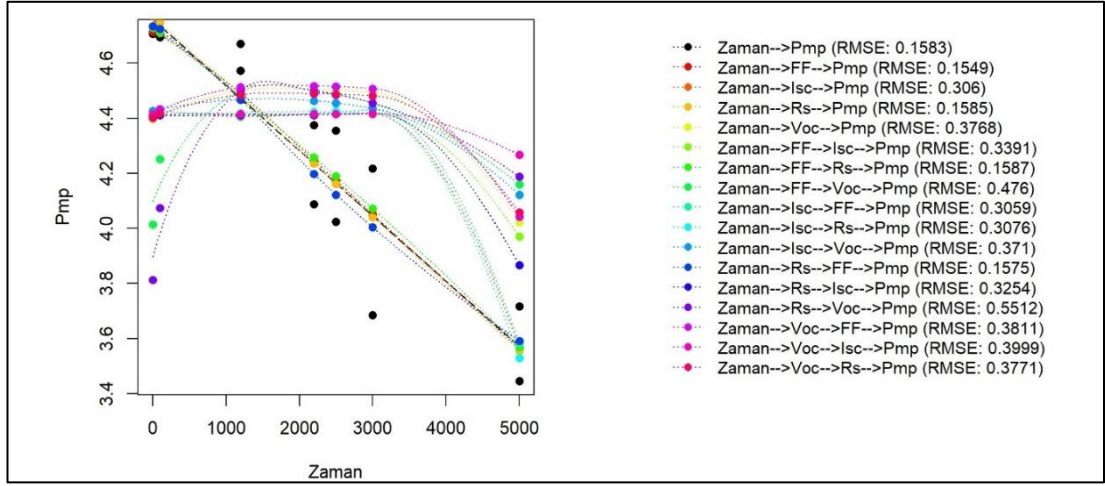
Şekil Ek-C.3: POE paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.



Şekil Ek-C.4: POE+SB paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.



Şekil Ek-C.5: TPO paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.



Şekil Ek-C.6: TPO+SB paneli için mekanistik değişkenlerin güç ile ilişkisi.